

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Katarina Kraševac

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Katarina Kraševac

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se voditeljici rada prof.dr.sc. Nastii Degiuli i asistentu dipl.ing. Ivanu Muniću na iskazanom povjerenju, odvojenom vremenu i pomoći tijekom izrade rada.

Katarina Kraševac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
 Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum: 21-09-2015. Prilog
Klasa: 602-04/15-613
Ur.broj: 15-1403-15-374

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Katarina Kraševac**

Mat. br.: 0035176946

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA PROPULZIJE PLOVILA NA LJUDSKI POGON**

Naslov rada na engleskom jeziku: **OPTIMIZATION OF PROPULSION OF HUMAN POWERED BOAT**

Opis zadatka:

Propulzijski sustav sastavljen od brodskog trupa, propulzora (najčešće brodski vijak), pogonskog stroja i kormila mora biti što je moguće efikasniji tj. energija utrošena na gibanje broda mora biti što je moguće manja. Propulzijski sustav mora biti međusobno uravnotežen, tako da su svi njegovi elementi (trup, vijak, pogonski stroj i kormilo) prilagođeni jedan drugome i čine skladan sustav, što osigurava visok stupanj iskoristivosti uložene energije, odnosno omogućava da energija uložena za gibanje broda zadanom brzinom bude što je moguće manja.

Za specijalno plovilo pogonjeno ljudskom snagom slijedećih karakteristika:

- tip plovila: katamaran,
- pogon: 2 osobe,
- propulzija: jednovijčana,

potrebno je optimizirati propulziju uzimajući u obzir:

- otpor trupa,
- snagu ljudskog pogona,
- karakteristike vijka.

U sklopu rada potrebno je izraditi programsku podršku za analizu i optimizaciju propulzije prema postojećem natjecateljskom brodociklu Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. OTPOR I PROPULZIJA	2
2.1. Općenito o otporu i propulziji.....	2
2.2. Podjela ukupnog otpora broda	2
2.2.1. Raščlana otpora	3
2.2.2. Dodatni otpor	5
2.3. Određivanje ukupnog otpora broda.....	6
2.3.1. Otpor trenja	6
2.3.2. Otpor valova.....	7
2.3.3. Viskozni otpor tlaka.....	8
2.3.4. Otpor zraka.....	8
2.3.5. Otpor privjesaka.....	9
2.4. Međusobni utjecaj trupa i vijka.....	9
2.5. Koeficijent sustrujanja i koeficijent upijanja	11
2.5.1. Određivanje koeficijenta sustrujanja.....	11
2.5.2. Određivanje koeficijenta upijanja	12
2.6. Stupanj utjecaja trupa.....	12
3. BRODSKI VIJCI.....	13
3.1. Geometrija vijka.....	13
3.2. Uzgonski profili i plohe krila vijka	17
3.3. Modelska ispitivanja vijaka	18
3.3.1. Hidrodinamička sličnost	18
3.3.2. Geometrijska sličnost.....	19
3.3.3. Kinematička sličnost.....	19
3.3.4. Dinamička sličnost.....	20
3.4. Serijska ispitivanja modela vijaka.....	20
3.4.1. Wageningenška B serija.....	21
3.5. Kavitacija	22
3.5.1. Kriteriji izbjegavanja kavitacije	24
3.5.2. Tipovi kavitacije	26
3.5.3. Negativne posljedice kavitacije vijka	29
4. OPĆENITO O BRODOCIKLU	31
4.1. Ljudski pogon	31
4.2. Tipovi brodocikla.....	32
4.2.1. Brodocikli FSB-a	34
4.2.2. Borac	37

4.3. Vijak brodocikla.....	38
5. PRORAČUN OTPORA I PROPULZIJE BRODOCIKLA.....	39
5.1. Proračun predane snage vijku	39
5.2. Proračun ukupnog otpora brodocikla na mirnoj vodi	39
5.2.1. Koeficijent otpora trenja	41
5.2.2. Koeficijent otpora valova.....	41
5.2.3. Koeficijent otpora privjesaka	42
5.2.4. Koeficijent otpora zraka.....	42
5.2.5. Koeficijent ukupnog otpora	43
5.3. Proračun vijka	44
5.3.1. Odabir i karakteristike serije vijka	44
5.3.2. Rezultati proračuna	49
5.4. Kavitacija	49
5.5. Kontrola čvrstoće krila vijka.....	52
6. PROGRAMSKI ALAT ZA ANALIZU I OPTIMIZACIJU VIJKA BRODOCIKLA.....	56
7. ZAKLJUČAK.....	59
LITERATURA.....	60
PRILOZI.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1. Dijelovi vijka [1]	14
Slika 2. Geometrija krila vijka [1]	14
Slika 3. Definicija koraka i skliza vijka [1]	15
Slika 4. Projicirana i raširena površina krila vijka [1]	16
Slika 5. Profil krila s lokalnom kavitacijom [1]	24
Slika 6. Burillov dijagram [4]	25
Slika 7. Slojasta kavitacija [4]	27
Slika 8. Mjehuričasta kavitacija [4]	27
Slika 9. Vrtložna kavitacija [4]	28
Slika 10. Ovisnost pojave kavitacije o upadnom kutu odsječka vijčanog krila [1]	29
Slika 11. Erozijska krila vijka [4]	30
Slika 12. Brodocikl [7]	31
Slika 13. Asimetrična katamaranska forma, brodocikl „Annac“ [7]	33
Slika 14. Trimaranska forma, brodocikl „Clementine“ [7]	33
Slika 15. Klasična forma- jednotrupac, brodocikl „Imperator“ [7]	34
Slika 16. Brodocikl "Vjera" [7]	35
Slika 17. Brodocikl "GosponZvir" [7]	35
Slika 18. Brodocikl "Tvrd" [7]	35
Slika 19. Brodocikl "Pegula 2"	36
Slika 20. Brodocikl "Munja"	36
Slika 21. Brodocikl "Borac"	37
Slika 22. Forma jednog trupa katamarana [5]	40
Slika 23. Unos parametara u Solver	48
Slika 24. Dubina osovine propelera	51
Slika 25. Određivanje brzine na $0,7R$	51
Slika 26. Dijagram ovisnosti ukupnog otpora o brzini	57

POPIS TABLICA

Tablica 1. Korekcija ΔK_T i ΔK_Q	45
Tablica 2. Koeficijenti za poriv i moment.....	46
Tablica 3. Materijali za vijke.....	54
Tablica 4. Ostali koeficijenti za proračun debljine krila vijka	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v	m/s	brzina broda
ρ	kg/m ³	gustoća morske vode
μ	kg/ms	dinamički koeficijent viskoznosti
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
R_T	N	ukupni otpor broda
C_T	-	koeficijent ukupnog otpora
R_n	-	Reynoldsov broj
F_n	-	Froudeov broj
S	m ²	oplakana površina
L	m	duljina broda
ν	m ² /s	kinemtički koeficijent viskoznosti
R_F	N	otpor trenja
R_P	N	otpor tlaka
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
R_{PV}	N	viskozni otpor tlaka
C_p	-	koeficijent otpora tlaka
C_{pv}	-	koeficijent viskoznog otpora tlaka
C_V	-	koeficijent viskoznog otpora
C_F	-	koeficijent otpora trenja
C_R	-	koeficijent preostalog otpora
R_{AP}	N	otpor privjesaka
R_{AR}	N	otpor hrapavosti oplata
R_{AA}	N	otpor zraka i vjetra
R_{AS}	N	otpor kormilarenja
P_E	W	efektivna snaga broda
P_T	W	snaga poriva
T	N	poriv
v_A	m/s	brzina dostrujavanja vode vijku
P_D	W	snaga predana vijku
n	s ⁻¹	broj okretaja vijka
Q	Nm	moment vijka
P_B	W	kočena snaga, snaga vozača
M	Nm	moment torzije
η_T	-	ukupna korisnost propulzije

η_H	-	korisnost trupa broda
η_B	-	korisnost vijka pri radu iza krme broda
η_S	-	stupanj korisnosti osovinskog voda
η_m	-	stupanj mehaničke korisnosti
t	-	koeficijent upijanja
w	-	koeficijent sustrujanja
K_T	-	koeficijent poriva
K_Q	-	koeficijent momenta
r	m	radijus vijka
P	m	uspon vijka
P/D	-	omjer uspona i promjera
D	m	promjer vijka
A_0	m ²	površina diska vijka
A_p	m ²	projicirana površina krila vijka
A_E	m ²	raširena površina krila vijka
λ	-	mjerilo geometrijske sličnosti
J	-	koeficijent napredovanja vijka
Z	-	broj krila vijka
A_E/A_0	-	omjer površina krila vijka
t_l	mm	minimalna debljina krila vijka

SAŽETAK

Propulzijski sustav specijalnog natjecateljskog plovila mora osiguravati visoki stupanj iskoristivosti snage i konkurentnu brzinu na natjecanjima.

Cilj ovog rada je optimizirati propulziju katamaranskog plovila s jednovijčanim propulzorom pogonjenog snagom ljudskih mišića.

U sklopu rada je iznesena programska podrška za optimizaciju i analizu propulzije prema postojećem natjecateljskom brodociklu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Program se temelji na regresijskim formulama za Wageningsku B seriju vijaka.

U proračunu je provedena kontrola kavitacije i čvrstoće krila vijka.

Ključne riječi: brodocikl, brodski vijak, katamaran, ukupni otpor, optimizacija

1. UVOD

Propulzijski sustav sastavljen od trupa broda, propulzora, pogonskog stroja i kormila projektira se tako da bude što efikasniji odnosno da energija utrošena na gibanje broda bude što je moguće manja. Takav sustav mora biti međusobno uravnotežen i skladan kako bi se osigurao visok stupanj iskoristivosti uložene energije.

Natjecateljski brodocikl Fakulteta strojarstva i brodogradnje već dugi niz godina sudjeluje na međunarodnoj regati brodocikala. Brodocikl je specijalno plovilo katamaranskog tipa, pogonjeno isključivo snagom ljudskih mišića i ima jednovijčanu propulziju.

Tijekom godina projektiranja, mjerenja i izrade brodocikala pokazala se potreba za optimiziranjem dijelova konstrukcije u svrhu poboljšanja iskoristivosti uložene energije.

Cilj ovog rada je napraviti programsku podršku za analizu i optimizaciju propulzije za postojeći natjecateljski brod.

Brodski vijak kao glavni propulzijski element mora biti projektiran tako da osigura konkurentnu brzinu broda.

Obzirom da je brodocikl podložan konstrukcijskim promjenama u vidu promjene razmaka između trupova ili promjene gaza ili discipline u kojoj sudjeluje, glavni cilj je pronaći vijak koji će imati maksimalnu iskoristivost uložene snage.

Optimizacijski program uzima u obzir otpor trupa, snagu ljudskog pogona i karakteristike vijka, a proveden je u programu Excel Microsoftovog paketa.

Proračun se temelji na regresijskim formulama za koeficijente poriva i momenata, jedinstvenima za Wageningesku B seriju vijaka za koju postoji niz dostupnih podataka potrebnih za proračun.

2. OTPOR I PROPULZIJA

2.1. Općenito o otporu i propulziji

Brod pri svojoj plovidbi izaziva poremećaje u okolišu, vodi i zraku. Otpor broda se bavi pojavama u tekućini oko broda pri jednolikom pravocrtnom gibanju dok propulzija ima zadaću osigurati potreban poriv uz maksimalno iskorištenje uložene energije.

Otpor broda je sila kojom se brod suprotstavlja pravocrtnom gibanju jednolikom brzinom. To je sila tegljenja, odnosno sila potrebna za održavanje jednolike brzine plovidbe bez korištenja propulzora. Ta sila djeluje na brod suprotno od smjera gibanja broda. Glavno nastojanje pri osnivanju broda jest napraviti takvu formu trupa koja će osigurati što je moguće manji otpor.

Propulzijski sustav koji se sastoji od pogonskoga stroja, prijenosnih uređaja i propulzora, razvija poriv koji pokreće plovilo, tj. silu potrebnu za svladavanje otpora kojim se voda i zrak opiru gibanju. Propulzor preuzima snagu pogonskoga stroja, vjetra ili čovjeka i pretvara je u porivnu silu [1].

2.2. Podjela ukupnog otpora broda

Ukupni otpor R_T bilo kojeg tijela koje se giba na površini vode složena je funkcija sljedećih parametara [2]:

- geometrije broda,
- brzine gibanja tijela - v ,
- svojstva tekućine (gustoća - ρ , dinamički koeficijent viskoznosti - μ),
- ubrzanja zemljine sile teže - g .

Iz predhodno navedenog slijedi:

$$R_T = f(\text{geometrije tijela}, v, \rho, \mu, g) \quad (1)$$

Kada je riječ o ukupnom otporu broda jednadžba (1) poprima sljedeći oblik:

$$R_T = C_T(\text{geometrije trupa}, R_n, F_n) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (2)$$

gdje je:

C_T - koeficijent ukupnog otpora ovisan o:

- geometriji broda,

- Reynoldsovom broju $R_n = \frac{v \cdot L}{\nu}$,
- Froudeovom broju $F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$,

S - oplakana površina broda.

2.2.1. Raščlana otpora

Zbog složenosti jednadžbe (1) potrebno je raščlaniti otpor na komponente odnosno pojedine vrste otpora [2].

Uz poznata tangencijalna naprezanja i hidrodinamičke tlakove u smjeru normale za sve točke oplakane površine trupa, ukupni otpor se može odrediti sljedećim izrazom:

$$R_T = \int_S \tau_0 \cdot \cos(\tau_0, x_1) \cdot dS + \int_S p \cdot \cos(p, x_1) \cdot dS \quad (3)$$

u kojem prvi član predstavlja otpor trenja:

$$R_F = \int_S \tau_0 \cdot \cos(\tau_0, x_1) \cdot dS \quad (4)$$

a drugi član predstavlja otpor tlaka:

$$R_p = \int_S p \cdot \cos(p, x_1) \cdot dS \quad (5)$$

Na taj način moguće je ukupni otpor podijeliti na dva dijela kako slijedi:

$$R_T = R_F + R_p \quad (6)$$

Takva podjela se temelji na saznanju da voda djeluje na brod kontinuirano raspoređenim površinskim silama. Strujanje oko trupa broda je podijeljeno u područja s dominantnim utjecajem viskoznosti, a to su granični sloj i hidrodinamički trag te na vanjsko područje sa zanemarivim utjecajem viskoznosti koje se još naziva područje potencijalnog strujanja. Ovako promatrajući ukupni otpor broda je podijeljen na komponente viskoznog otpora uslijed viskoznih učinaka u graničnom sloju i na otpor potencijalnog strujanja. Otpor potencijalnog strujanja postoji samo ukoliko tijelo svojim gibanjem kroz tekućinu generira valove što znači da se sada ukupni otpor može podijeliti kako slijedi:

$$R_T = R_V + R_W \quad (7)$$

gdje je:

R_V - viskozni otpor,

R_W - otpor valova.

Viskozni otpor je funkcija Reynoldsovog broja te je jedan dio posljedica tangencijalnih naprežanja između vode i oplata broda, a drugi dio je posljedica promjene tlaka duž trupa broda koji je pak uzrokovan viskoznim pojavama unutar graničnog sloja. Stvaranje valova na površini odražava se daljnjom promjenom tlaka duž trupa broda i funkcija je Froudeovog broja.

Mjerenja tlaka duž trupa broda pokazuju da se u realnoj tekućini bez prisustva slobodne površine ne ostvaruju isti tlakovi kao u slučaju prisustva slobodne površine [2]. Stvaranje valova na slobodnoj površini odražava se daljnjom promjenom tlaka duž trupa broda i shodno tome možemo podijeliti hidrodinamički tlak odnosno otpor tlaka na:

$$R_p = \int_S p_{pV} \cdot \cos(p, x_1) \cdot dS + \int_S p_W \cdot \cos(p, x_1) \cdot dS \quad (8)$$

odnosno:

$$R_p = R_{pV} + R_W \quad (9)$$

$$R_p = C_p(R_n, F_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (10)$$

$$R_{pV} = C_{pV}(R_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (11)$$

$$R_W = C_W(F_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (12)$$

gdje je:

C_p - koeficijent otpora tlaka,

C_{pV} - koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_W - koeficijent otpora valova.

Iz toga slijedi da je viskozni otpor sastavljen od otpora trenja i viskoznog otpora tlaka:

$$R_V = R_F + R_{pV} \quad (13)$$

$$R_V = C_F(R_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S + C_{PV}(R_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (14)$$

$$R_V = [C_F(R_n) + C_{PV}(R_n)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (15)$$

$$R_V = C_V(R_n) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (16)$$

gdje je:

C_F - koeficijent otpora trenja,

C_{PV} - koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_V - koeficijent viskoznog otpora.

2.2.2. Dodatni otpor

Osim gore navedenog svakako je potrebno uvesti još i pojam dodatnih otpora koji su uglavnom viskoznog porijekla, a mogu biti i posljedica stvaranja valova. U dodatne komponente otpora mogu se ubrojiti:

- otpor privjesaka R_{AP} ,
- otpor hrapavosti oplata R_{AR} ,
- otpor zraka i vjetra R_{AA} ,
- otpor kormilarenja R_{AS} .

Osim nabrojanih komponenata ukupni otpor može porasti i zbog utjecaja okoline što podrazumijeva plovidbu u:

- ograničenoj vodi gdje postoji utjecaj stijenki,
- plitkoj vodi gdje postoji utjecaj dna.

Konačno, ukupni otpor broda može se raščlaniti na sljedeći način:

$$R_T = [C_F(R_n) + C_{PV}(R_n) + C_W(F_n)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (17)$$

odnosno na

$$R_T = [C_F(R_n) + C_{PV}(R_n) + C_W(F_n) + C_A] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (18)$$

gdje je C_A koeficijent dodatnog otpora.

2.3. Određivanje ukupnog otpora broda

Za praktične svrhe se ukupni otpor broda računa prema sljedećem izrazu:

$$R_T = C_T \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad (19)$$

gdje je:

C_T - koeficijent ukupnog otpora,

ρ - gustoća vode,

S - oplakana površina,

v - brzina broda.

Određivanje otpora broda se tako svodi na određivanje koeficijenta ukupnog otpora.

Iz jednadžbe (19) je vidljivo da se u svrhu smanjenja otpora može djelovati na koeficijent ukupnog otpora i na veličinu oplakane površine. Očito je cilj da oplakana površina bude što manja, jer o njoj izravno ovisi otpor broda. Koeficijent ukupnog otpora može se, analogno sa podjelom otpora, izraziti kao:

$$C_T = C_F + C_R \quad (20)$$

gdje je:

C_F - koeficijent otpora trenja,

C_R - koeficijent preostalog otpora.

2.3.1. Otpor trenja

Otpor trenja je komponenta ukupnog otpora dobivena integriranjem tangencijalnih naprezanja preko oplakane površine trupa broda u smjeru gibanja broda. Tangencijalne sile nastaju zbog viskoznosti tekućine koja pak ovisi o tipu i temperaturi tekućine te o obliku strujanja. Otpor trenja raste s hrapavošću i sa zakrivljenošću površine. Zato je potrebno da površina bude što glađa, a forma što vitkija. Zbog vrlo složene prirode problema, ne postoje analitičke metode koje bi s dovoljnom točnošću i sigurnošću odredile te komponente. Zato se ukupni otpor najčešće određuje ispitivanjima u hidrodinamičkim laboratorijima (bazenima), na temelju rezultata serijskih ispitivanja, iskustvenim formulama, te uz pomoć računala primjenom numeričke mehanike fluida. Koeficijent otpora trenja C_F se računa pomoću empirijske

formule koje je 1957. godine predložio ITTC (International Towing Tank Conference), a glasi:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (21)$$

gdje je:

R_n - Reynoldsov broj, bezdimenzionalni parametar koji izražava odnos između inercijskih i viskoznih sila u tekućini.

Reynoldsov broj je definiran kao:

$$Rn = \frac{v \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (22)$$

gdje je:

v - brzina broda,

L - duljina broda,

ρ - gustoća fluida,

ν - kinemtički koeficijent viskoznosti,

μ - dinamički koeficijent viskoznosti.

Vidljivo je da se povećanjem Reynoldsovog broja, odnosno povećanjem brzine, koeficijent otpora smanjuje pa kod većih brzina otpor valova može imati veći utjecaj na ukupni otpor broda nego otpor trenja.

2.3.2. Otpor valova

Otpor valova je komponenta otpora vezana uz energiju potrebnu za stvaranje slike vala iza broda. Pramac broda je jako bitan za formiranje valova. Ulazni kut vodne linije mora biti malen da ne dođe do lomljenja valova čime se bitno povećava otpor. Na smanjenje ulaznog kuta vodne linije utječe i pomicanje težišta istisnine prema krmi. Otpor valova se smanjuje povećanjem duljine broda.

Koeficijent otpora valova C_w se može odrediti ispitivanjem modela broda u hidrodinamičkom bazenu mjerenjem profila valova iza modela broda. Moguće ga odrediti numeričkim metodama koje se temelje na teoriji potencijalnog strujanja.

Froudeov broj je bezdimenzijski parametar koji izražava odnos inercijskih i gravitacijskih sila, a glasi:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (23)$$

gdje je:

v - brzina broda,

g - gravitacijska konstanta,

L - duljina broda.

Porastom Froudeovog broja, odnosno povećanjem brzine, koeficijent otpora valova raste pa je cilj povećati duljinu broda kako bi se smanjio otpor.

2.3.3. Viskozni otpor tlaka

Viskozni otpor tlaka je posljedica postojanja graničnog sloja, ovisan je o Reynoldsovom broju i obliku trupa broda.

Viskozni otpor tlaka je komponenta otpora koja se dobije integriranjem dijela normalne sile u smjeru gibanja broda. Nastaje zbog smanjenja pozitivnog gradijenta tlaka na krmi broda uslijed trenja i odvajanja strujanja [2].

Koeficijent viskoznog otpora tlaka je za forme bez odvajanja strujanja proporcionalan koeficijentu otpora trenja pa se obično dodaje kao povećanje koeficijenta otpora trenja za faktor forme k . Faktor forme se obično određuje iskustvenim formulama ili iz dijagrama te eksperimentalnim putem metodom Prohaske.

2.3.4. Otpor zraka

Otpor zraka [2] je ovisan o relativnoj brzini broda prema zraku i o površini nadvodnog dijela broda pa zato na otpor zraka utječe brzina i smjer vjetera. Otpor zraka nadgrađa nastaje prvenstveno zbog vrtloga koji se stvaranju oko njega pa je pogodno aerodinamički oblikovati nadvodni dio broda, pogotovo ako se radi o brzim brodovima. Otpor zraka nadgrađa raste s kvadratom brzine zraka, a utjecaj Reynoldsovog broja je zanemariv. Za brod koji ploviti pri mirnom zraku i bez vjetera, otpor zraka se može odrediti sljedećim izrazom:

$$R_{AA} = C_{AA} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_T \quad (24)$$

gdje je:

C_{AA} - koeficijent otpora zraka,

ρ - gustoća zraka,

A_T - površina nadvodnog dijela broda,

v - brzina broda.

2.3.5. Otpor privjesaka

Sila otpora privjesaka se izražava u na isti način kao i sila ukupnog otpora broda i pribraja se sili ukupnog otpora.

Sila otpora privjesaka definira se kao:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \cdot C_{APP} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_{PP} \quad (25)$$

gdje je:

C_{APP} - koeficijent otpora privjesaka,

ρ - gustoća vode,

A_{PP} - površina privjeska,

v - brzina broda.

2.4. Međusobni utjecaj trupa i vijka

Ukupni otpor trupa broda je potrebno svladati silom poriva koju proizvodi porivni uređaj, u ovom slučaju brodski vijak koji mora biti projektiran tako da što efikasnije prenese njemu dovedenu energiju na okolnu vodu i time ostvari poriv [1]. Brodski vijak ima dosta visok stupanj korisnosti i danas je najčešći u primjeni. Povećanje promjera vijka općenito povećava korisnost. To je poboljšanje kod slabo opterećenih vijaka jako malo, ali se zato povećava otpor stupa bulba, jer se vijak mora više uroniti da ne dođe do usisavanja zraka, a i moment savijanja stupa je tako veći.

Sila poriva koju vijak stvara je komponenta sile uzgona rotirajućih krila vijka.

Kako bi se mogla analizirati interakcija između trupa broda i broskog vijka potrebno je definirati neke veličine.

Snaga potrebna za gibanje broda kroz vodu tj. snaga tegljenja naziva se efektivna snaga ili snaga ukupnog otpora P_E i određuje se prema izrazu:

$$P_E = R_T \cdot v \quad (26)$$

gdje je:

R_T - ukupni otpor broda,

v - brzina broda.

Brodski vijak stvara silu poriva T odnosno proizvodi snagu poriva danu izrazom:

$$P_T = T \cdot v_A \quad (27)$$

gdje je:

T - poriv vijka,

v_A - brzina dostrujavanja vode vijku odnosno brzina napredovanja vijka kroz vodu.

Snaga predana vijku se definira kao:

$$P_D = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot Q \quad (28)$$

gdje je:

Q - moment predan vijku,

n - broj okretaja vijka.

Kočena snaga je snaga izmjerena na kočnici a određuje se na sljedeći način:

$$P_B = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad (29)$$

gdje je:

M - moment torzije pogonskog stroja,

n - broj okretaja pogonskog stroja.

Omjeri snaga definiraju stupnjeve djelovanja odnosno stupnjeve iskoristivosti snage kako slijedi:

$$\frac{P_E}{P_I} = \frac{P_E}{P_T} \cdot \frac{P_T}{P_D} \cdot \frac{P_D}{P_H} \cdot \frac{P_H}{P_I} \quad (30)$$

$$\eta_T = \eta_H \cdot \eta_B \cdot \eta_S \cdot \eta_m \quad (31)$$

gdje je:

η_T - ukupni stupanj korisnosti,

η_H - stupanj korisnosti trupa,

η_B - stupanj korisnosti vijka pri radu iza krme broda,

η_S - stupanj korisnosti osovinskog voda,

η_m - stupanj mehaničke korisnosti.

Stupanj utjecaja trupa se određuje preko omjera efektivne snage i snage poriva na sljedeći način:

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{R_T \cdot v}{T \cdot v_A} = \frac{\frac{R_T}{T}}{\frac{v_A}{v}} = \frac{1-t}{1-w} \quad (32)$$

gdje je:

t - koeficijent upijanja,

w - koeficijent sustrujanja.

2.5. Koeficijent sustrujanja i koeficijent upijanja

Brzina sustrujanja je razlika između brzine broda v i aksijalne komponente brzine dostrujavanja vode vijku v_A [2]. Dijeljenjem ove razlike s brzinom broda dobije se koeficijent sustrujanja prema Tayloru:

$$w = \frac{v - v_A}{v} = 1 - \frac{v_A}{v} \quad (33)$$

Postoji još i Froudeova definicija za koeficijent sustrujanja koja glasi:

$$w = \frac{v - v_A}{v_A} = \frac{v}{v_A} - 1 \quad (34)$$

Koeficijent sustrujanja se može podijeliti na tri komponente koje se odnose na gibanje broda u idealnoj tekućini bez trenja i valova na slobodnoj površini (potencijalno strujanje), na trenje u graničnom sloju i sustrujanje valova koje potječe od gibanja čestica vode u valu.

2.5.1. Određivanje koeficijenta sustrujanja

Koeficijent sustrujanja možemo odrediti pomoću brodskog vijka koji djeluje kao integrator sustrujanja i u tom slučaju koeficijent sustrujanja nazivamo koeficijentom efektivnog

sustrujanja w . U slučaju kada koeficijent određujemo na mjestu vijka kada vijka nema, tada govorimo o koeficijentu nominalnog sustrujanja w_N .

Efektivni koeficijent sustrujanja se određuje kao razlika između brzine v u pokusu vlastitog pogona i brzine v_A u pokusu slobodne vožnje vijka te se dobiju dvije vrijednosti, jedna iz jednakosti konstanta poriva K_T , a druga iz jednakosti konstanta momenata K_Q .

Nominalni koeficijent strujanja se određuje mjerenjem i to pomoću Prandtl-Pitotove cijevi, krilaca, prstenova te lasera.

2.5.2. Određivanje koeficijenta upijanja

Kada se vijak okreće odnosno kada stvara poriv, svojim radom usisava (upija) vodu oko sebe. Rezultat toga je porast otpora zbog efekta pada tlaka na krmenom dijelu broda. Sila poriva je veća od sile tegljenja broda, a razlika između sile poriva i sile tegljenja je povećanje otpora vlastitog pogona broda. Međutim uobičajena praksa je spomenuto povećanje otpora gledati na način da se smanji poriv kojeg stvara brodski vijak i to kako slijedi:

$$t = \frac{T - R_T}{R_T} = 1 - \frac{R_T}{T} \quad (35)$$

Koeficijent upijanja se također može podijeliti u tri komponente i to na potencijalno upijanje, upijanje trenja i upijanje valova. Ovisan je o formi trupa, smještaju vijka u odnosu na trup broda i kormilo, opterećenju vijka, omjeru površina diska vijka i središnjem presjeku trupa, koeficijentu napredovanja, dubini vode i broju vijaka.

2.6. Stupanj utjecaja trupa

Stupanj utjecaja trupa ili koeficijent iskoristivosti trupa određen je vrijednostima koeficijenta upijanja i koeficijenta sustrujanja na sljedeći način:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (36)$$

Predstavlja interakciju između trupa broda i broskog vijka. Vrijednost koeficijenta iskoristivosti trupa kod jednovijčanih brodova je obično veća od jedan.

3. BRODSKI VIJCI

3.1. Geometrija vijka

Brodski vijak se sastoji od glavine koja je šuplja zbog smještaja na vijčanu osovinu [3]. Na glavini se svojim korijenom drže krila vijka kojih može biti od 2 do 9. Ukoliko je vijak zajedno s glavinom istodobno lijevan onda je to monolitni vijak, a ako su mu krila izrađena svako posebno tada je riječ o sastavljenom vijku. Također se razlikuju krila vijka s upravljivim usponom i s fiksnim usponom. Smjer okretanja vijka se definira promatrajući vijak s krme prema pramcu odnosno u pozitivnom smjeru x osi koordinatnog sustava broda.

Gledajući tako, vijak koji se okreće u smjeru kazaljke na satu jest desnokretni vijak, a suprotno tome je lijevokretni. Mjesto na kojem se krilo spaja s glavinom odnosno korijen krila je izveden sa zadebljanjem kako bi se bolje raspodjelila opterećenja krila. Također kada se tako promatra vijak vidimo tlačnu stranu krila koja se još naziva i lice. Suprotna strana je naličje, zatiljak ili leđa i to je potlačna strana krila vijka.

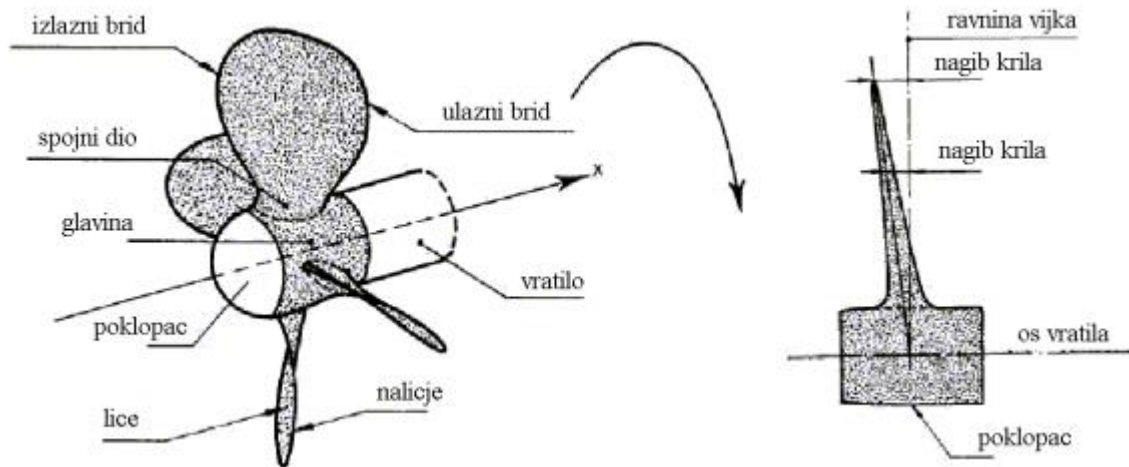
Brid krila koji prvi ulazi u vodu je ulazni brid, a brid koji napušta vodu je izlazni brid. Ova dva brida se sastaju na vrhu krila, a ukoliko je to jedna točka onda se naziva vršak krila [1].

Pravac koji prolazi između ulaznog i izlaznog brida je tetiva, a udaljenost između bridova je duljina tetive. Kut koji zatvara pravac dostrujavanja vode s tetivom naziva se upadni kut.

Udaljenost između usisne i tlačne strane krila mjerena okomito na tetivu je debljina krila vijka. Krivulja koja prolazi kroz polovicu debljine je krivulja zakrivljenja profila.

Krila vijka približno prate dobro poznate geometrijske oblike – vijčane plohe ili tako zvane hekloidne linije ili kratko vijčanice i one su osnovne prostorne krivulje koje služe za geometrijsko opisivanje vijka.

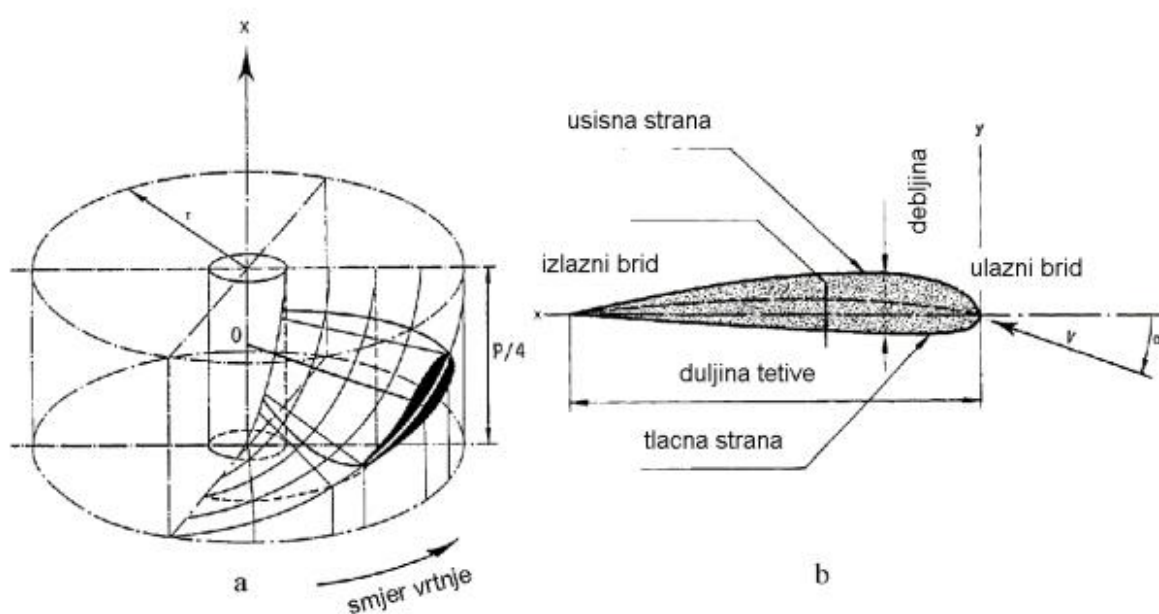
Na Slici 1., [1], je prikazan desnokretni brodski vijak s četiri krila i njegovi dijelovi.



Slika 1. Dijelovi vijka [1]

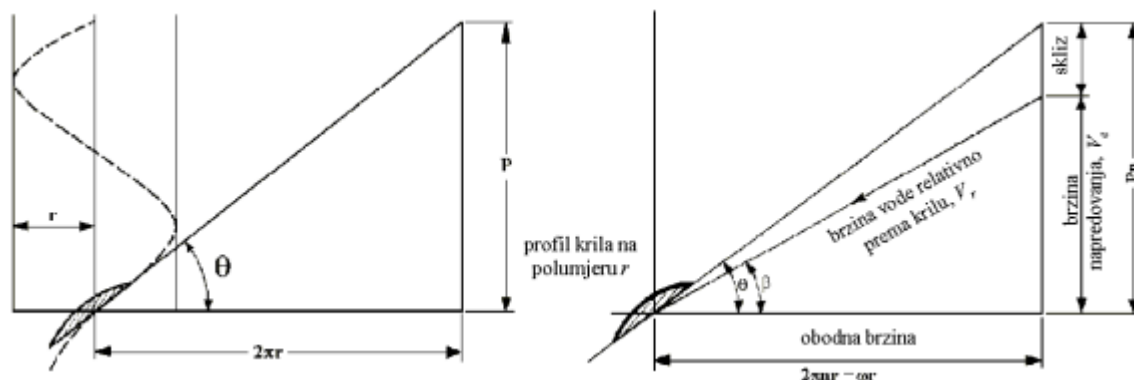
Razmatanjem valjkaste plohe polumjera r u ravninu dobiva se vijčana linija pomoću koje se može prikazati pravokutni trokut kojemu su katete duljina opsega valjkaste plohe $2r\pi$ i uspon vijčanice, a hipotenuza im je razvijena vijčanica. Taj trokut se naziva trokut uspona. Uspon ili korak vijka P je aksijalni pomak točke pri jednom okretaju $2r\pi$.

Na Slici 2.a) je prikazan vijak s jednim krilom u presjeku na proizvoljno odabranom polumjeru i prikazuje geometriju krila vijka, a na Slici 2.b) prikazan je profil tog krila [1].



Slika 2. Geometrija krila vijka [1]

Budući da se vijak nalazi u vodi, stvarni aksijalni pomak vijka načelno nikada nije jednak njegovom koraku. Omjer uspona definiran je kao omjer koraka vijka i njegovog promjera P/D . Korak vijka je linearni pomak koji vijak prođe u jednom punom okretu za 360 stupnjeva. Ovisi o usponu krila. Na Slici 3. prikazana je definicija koraka i skliza vijka [1].



Slika 3. Definicija koraka i skliza vijka [1]

Kad je riječ o usponu, razlikuju se vijci s nepromjenjivim korakom odnosno usponom i vijci s promjenjivim usponom.

Vijci s nepromjenjivim usponom (*FPP-eng. fixed pitch propeller*) su najrasprostranjeniji propulzori. Proizvode poriv na način da se na njihovim krilima stvara sila uzgona (*eng. lift*). Ovakva krila su vrlo pogodna za nastanak kavitacije pa je potrebno svaki propeler projektirati posebno za svaki tip broda.

Vijci s promjenjivim usponom (*CPP-eng. controllable pitch propeller*) imaju sposobnost mijenjanja kuta zakreta krila odnosno uspona pa se pomoću njih regulira poriv broda. Broj okretaja kod ovakvih vijaka je obično konstantan. Također, ovakvi vijci imaju samo jedan projekttni korak pri kojem imaju najveću iskoristivost.

Značajan polumjer porivnog vijka obično iznosi $r/R=0,7$. Smatra se da u području koje se nalazi na toj udaljenosti vlada tlak koji je jednak tlaku diska vijka. To proizlazi iz činjenice da je polovica ukupne površine diska vijka u području $r=0,7R$.

Ravnina koja je okomita na osovinu vijka i presjeca tetivu na sjecištu sa središnjicom osovine vijka naziva se ravninom vijka.

Projekcijom bridova krila na ravninu vijka dobije se projicirana površina krila (*eng. projected blade area*). Takva projekcija krila može se dobiti fotografiranjem vijka koji je položen na ravnu površinu tako da su mu sva krila jednako udaljena od podloge.

Raširena površina krila (*eng. expanded blade area*) se dobiva iz stvarne vijčane površine i to zakretanjem vijčanih linija oko središta za odgovarajuće kutove uspona i njihovim razvijanjem u pravac. Razvijena i razvrnuta površina se razlikuju tim više što je zakrivljenija krivulja zakrivljenosti profila pojedinih odsječaka. Kod razvijene površine ona postaje ravna crta.

Jedan od važnijih parametara propulzijskog vijka je omjer površina:

- omjer projicirane površine (*eng. projected blade area ratio*) A_p/A_0 ,
- omjer razvijene površine (*eng. expanded blade area ratio*) A_E/A_0 ,

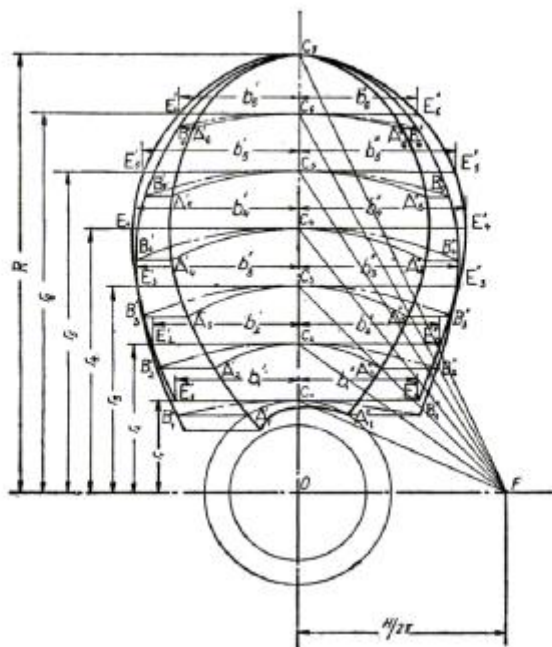
gdje je:

A_0 - površina diska odnosno površina kruga vijka promjera D , $A_0 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} = R^2 \cdot \pi$,

A_p - projicirana površina krila vijka,

A_E - raširena površina krila vijka.

Slika 4. prikazuje projiciranu i raširenu površinu krila vijka.



Slika 4. Projicirana i raširena površina krila vijka [1]

Fizikalno je najznačajniji omjer razvijene površine A_E/A_0 pa se pod omjerom površina obično podrazumjeva upravo taj omjer. Na površini krila vijka bit će manji otpor trenja što je omjer

razvijene površine manji, odnosno za postizanje istog poriva smanjenje površine krila uvjetuje povećanje broja okretaja vijka. Povećanje broja okretaja uzrokuje veće brzine strujanja vode oko krila vijka odnosno snižavanje tlakova što pak povećava rizik od nastanka kavitacije.

3.2. Uzgonski profili i plohe krila vijka

Pri gibanju tijela kroz mirnu tekućinu ostvaruje se polje naprezanja koje djeluje na to tijelo i u suprotnom smjeru na tekućinu koja opstrujava to tijelo. Takvo polje naprezanja u kontinuumu se predočava tenzorskim poljem odnosno funkcijom koja svakoj točki u prostoru pridružuje jedan i samo jedan tenzor. Takvo polje naprezanja kod idealnih tekućina ima samo tlačnu komponentu dok u viskoznim tekućinama nastaje i tangencijalno naprezanje.

Sila na tijelo u idealnoj tekućini isključivo je posljedica djelovanja tlačnog polja okolne tekućine na samoj granici tijela. Tlak se mijenja kad se mijenja brzina strujanja, a sve zbog inercije tekućine.

Pri strujanju neviskozne tekućine posljedica djelovanja tlačnog polja na pojedine elemente površine krila je razultantna hidrodinamička sila koja se dobiva integracijom po tlačnoj i potlačnoj strani profila i naziva se uzgon.

Uzgon je sila okomita na pravac vektora brzine neporemećenog strujanja.

U slučaju kada se ne javlja odvajanje strujanja ni kavitacija, povećanje tlaka na tlačnoj strani je manje od smanjenja na potlačnoj strani profila pa se uzima da je prilično $2/3$ uzgona stvoreno potlakom, a $1/3$ pretlakom.

Krila se koriste da bi se mogao ostvariti uzgon koji mora biti puno veći od otpora krila. Krilo ima karakteristiku da mu je vrijednost jedne dimenzije mala (debljina krila), a druge dvije dimenzije su velike pa je zapravo ovdje riječ o plosnatoj, pločastoj konstrukciji. Razreže li se krilo vijka u smjeru strujanja dobiva se presjek karakterističnog oblika koji se naziva hidrodinamički, aerodinamički, strujni ili uzgonski profil.

Zadaća uzgonskog profila je već spomenuti mali otpor u odnosu na uzgon i velika otpornost na kavitaciju.

Hidrodinamički profili su uglavnom izduženi ravninski likovi koji imaju oštre ili zaobljene bridove. Mogu biti simetrični i asimtrični, bikonveksni, plankoveksni, konkavkonveksni, a središnjica im može imati i točku infleksije.

Uzgon profila bitno ovisi o napadnom kutu. Napadni kut je onaj kut kojeg zatvara pravac neporemećenog strujanja s profilom pri čemu razlikujemo konvencionalni i efektivni napadni kut.

Ovisno o napadnom kutu nastrujavanja tekućine može se pojaviti odvajanje strujanja što je vrlo nepoželjna pojava, jer smanjuje uzgon profila. Odvajanje strujanja je zapravo udaljavanje struje tekućine od krutog tijela, a može se pojaviti kod idealne i kod realne tekućine.

Odvajanje strujanja može nastati:

- kao posljedica natražnog strujanja u graničnom sloju,
- zbog postojanja diskontinuiteta granice optjecanog krutog tijela.

Natražno strujanje u graničnom sloju nastaje zbog gubitka kinetičke energije mase graničnog sloja, odnosno pozitivni gradijent tlaka zbog promjene brzine naglo počinje padati. U točki zastoja u kojoj je gradijent jednak nuli počinje natražno strujanje, a iza točke odvajanja gradijent je pozitivan.

Odvajanje zbog nekontinuirane površine može se još nazvati i inercijsko odvajanje, a nastaje kao posljedica nastavka strujanja u smjeru brzine koja vlada ispred diskontinuiteta. Ovakvo odvajanje se javlja kod superkavitirajućih profila, na zrcalu brzih brodova ili na poprečnim stepenicama glisera.

3.3. Modelska ispitivanja vijaka

Rad broskog vijka prikazan hidrodinamičkim modelom vjerno pokazuje sliku o pojavama koje se zaista zbivaju u naravi. Pokusi na stvarnim modelima u naravi daju najtočnije rezultate no oni su zbog svoje veličine teški, skupi, spori, a često i neizvedivi pa se zato primjenjuju fizički materijalni modeli u smanjenom mjerilu. Osim za provjeru teorije, pokusi s modelima daju dovoljno dobre informacije potrebne kod projektiranja nekog tehničkog objekta, pogotovo u slučaju kad ne postoji dovoljno pouzdana teorija.

3.3.1. Hidrodinamička sličnost

Primjenu rezultata prikupljenih ispitivanjem modela za dobivanje željenih informacija o objektu u naravi omogućuje teorija sličnosti.

Da bi se fizikalne pojave mogle pouzdano prenijeti s modela na brod potrebno je osigurati hidrodinamičku sličnost što podrazumijeva zadovoljenje geometrijske, kinematičke i dinamičke sličnosti [2].

3.3.2. Geometrijska sličnost

Prvi i osnovni uvjet sličnosti je geometrijska sličnost modela i objekta. Ona podrazumijeva da su sve linearne dimenzije modela i objekta u stalnom međusobnom odnosu, to jest da su međusobno proporcionalne. Omjer karakterističnih dimenzija objekta u naravnoj veličini i njegovog modela se zove mjerilo geometrijske sličnosti ili mjerilo modela λ .

Kod vijka je mjerilo određeno izrazom:

$$\lambda = \frac{D_S}{D_M} \quad (37)$$

gdje je:

D_S - promjer vijka,

D_M - promjer vijčanog modela.

Geometrijska sličnost je nužni uvjet da bi jedan objekt uopće bio fizički model drugog objekta.

3.3.3. Kinematička sličnost

Sljedeća sličnost koja se pojavljuje u hidromehanici je kinematička sličnost, a nužan uvjet za ostvarenje iste je postojanje geometrijske sličnosti. Osim toga kinematička sličnost zahtjeva i proporcionalnost odgovarajućih brzina na modelu i u naravi. U kinematički sličnim sustavima modela i broda vektori brzina i ubrzanja u odgovarajućim prostorno-vremenskim točkama istog su smjera, međusobno su paralelni, a veličine su im u stalnom odnosu.

Prilikom provedbe pokusa s modelom brodskog vijka, omjer između brzine napredovanja i obodne brzine bilo kojeg elementa krila vijka mora biti isti kao odgovarajući omjer za vijak broda u naravi. To znači da vrijede sljedeći izrazi:

$$\frac{v_M}{n_M(2\pi \cdot R_M)} = \frac{v_S}{n_S(2\pi \cdot R_S)} \quad (38)$$

ili

$$\frac{v_M}{n_M \cdot D_M} = \frac{v_S}{n_S \cdot D_S} \quad (39)$$

ili

$$J_M = J_S \quad (40)$$

gdje je:

R - radijus elementa kojeg razmatramo,

v - brzina napredovanja,

n - broj okretaja,

D - promjer vijka,

J - koeficijent napredovanja.

3.3.4. Dinamička sličnost

Pri dinamičkoj sličnosti sustava model-brod vektori sila i momenata u odgovarajućim prostorno-vremenskim točkama istog su smjera, međusobno su paralelni i veličine su im u stalnom odnosu. Ovdje se razmatraju četiri različita stanja tekućine u kojemu se model može naći a to su:

- nestlačiva tekućina bez trenja i bez slobodne površine,
- nestlačiva tekućina bez trenja i sa slobodnom površinom,
- nestlačiva tekućina s trenjem i bez slobodne površine,
- nestlačiva tekućina s trenjem i sa slobodnom površinom.

Iz zadnjeg slučaja koji je očito realna tekućina, može se zaključiti da nije moguće potpuno zadovoljiti dinamičku sličnost odnosno da se sile izmjerene na modelu ne mogu direktno prenositi na brod jednostavnim množenjem s mjerilom. U tom slučaju je potrebno primjeniti posebne metode.

3.4. Serijska ispitivanja modela vijaka

Poteškoće koje se javljaju pri određivanju geometrijskih značajki projektiranog vijka rješavaju se pomoću serijskih dijagrama koji su napravljeni na temelju modelskih ispitivanja.

Kod takvih sistemskih serija sustavno se mijenjaju geometrijske značajke kao što su broj krila Z , omjer uspona P/D , omjer površina A_E/A_0 . Zadržavanjem istog oblika središnjice profila osigurava se afina sličnost obrisa krila i isti tip krilnih presjeka u čitavom području mijenjanja parametara.

Računala su omogućila korištenje regresijskih analiza pomoću kojih se brzo i jednostavno mogu izračunati posebne vrste statističkih modela, temeljene na klasičnoj Gaussovoj metodi aproksimacije.

3.4.1. Wageningenška B serija

Najrasprostranjeniji sustavni niz modela je Wageningenška B serija koja je dobila ime po nizozemskom gradu u kojem je sjedište i laboratorij MARIN (Maritime Research Institute Netherlands), jedan od najpoznatijih hidrodinamičkih laboratorija u svijetu za ispitivanje modela brodova [3].

Ova serija danas obuhvaća vijke s 2 do 7 krila, omjerom površina A_E/A_0 od 0,3 do 1,05, a ispitani omjeri uspona P/D su: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 i 1,4.

Tijekom vremena je serija proširena novim modelima, a dijagrami su ispravljani izgladivanjem. Kasnije je primjenjena tehnika linearne regresijske analize i korekcija utjecaja Reynoldsovog broja. Također su objavljene regresijske formule za K_T i K_Q . Opći oblik regresijskih formula glasi:

$$K_T = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^T \cdot J^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_0)^u \cdot Z^v \quad (41)$$

$$K_Q = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^Q \cdot J^s \cdot (P/D)^t \cdot (A_E/A_0)^u \cdot Z^v \quad (42)$$

Objavljene su tablice u kojima su dane vrijednosti za eksponente s, t, u, v i koeficijenti $C_{s,t,u,v}^T$ i $C_{s,t,u,v}^Q$ [4].

Izraz za K_T ima 39, a za K_Q 47 članova te je jasno da su ovakve formule prikladne za primjenu samo ako se koristi računalo.

Koeficijenti poriva i momenta izračunati prema regresijskim jednadžbama vrijede za područje Reynoldsovih brojeva većih od $2 \cdot 10^6$ i za standardni omjer t/c na $r/R = 0,75$. Za

vrijednosti koje odstupaju od navedenih izračunavaju se korekcijski dodaci ΔK_T i ΔK_Q pomoću posebnih regresijskih formula u koje ulazi i $\log R_n$.

S povećanjem Reynoldsovog broja smanjuje se koeficijent otpora profila C_D , a to za posljedicu ima porast poriva i smanjenje momenta, tako da stupanj korisnosti pojačano raste.

Osim Wageningske B serije koja se koristi za projektiranje vijaka velikih trgovačkih brodova, u Wageningenu su ispitane i razne serije vijaka u sapnici koji se koriste na brodovima s jako opterećenim vijcima kao što su tegljači, gurači, kočarice i slično.

Od ostalih serija valja spomenuti Gawnovu seriju trokrilnih vijaka velikog omjera raširene površine koja je razvijena za poriv brzih brodova, Newton-Raderoveu seriju vijaka koji rade u uvjetima razvijene kavitacije, te švedsku seriju SSPA superkavitirajućih vijaka s klinastim profilima [3].

3.5. Kavitacija

Kavitacija je fizička pojava, proces razgrađivanja sloja tekućine u blizini plohe krutog tijela. Tijelo uronjeno u strujanje razmiče nastrujavanu tekućinu i time mijenja polje brzina i polje tlakova koji postižu ekstremne, najveće i najmanje vrijednosti na površini tijela [1].

Kavitacija nastaje u područjima nehomogenog polja brzine odnosno na područjima gdje se lokalno mijenja tlak, bilo kao posljedica promjene brzine ili posljedica vibriranja neke krute stijenke koja je u dodiru s tekućinom. U trenutku kada se zbog promjene brzine strujanja, promjene smjera strujanja ili sniženjem okolnog tlaka, tlak u promatranoj točki padne ispod vrijednosti tlaka isparavanja tekućine, stvaraju se uvjeti za nastajanje kavitacije odnosno mjehurići prisutni u tekućini na tom mjestu počinju rasti i stvara se šupljina ispunjena parom kapljevine, obično zrakom. Tlak u nastalom mjehuriću karakterizira takozvanu kavitacijsku čvrstoću kapljevine iz kojih se razvijaju veći mjehuri i kavitacijske šupljine-kaverne i tada kažemo da je nastala kavitacija odnosno da kapljevina kavitira.

Mjehurić se dalje giba kroz nejednoliko polje brzina odnosno tlakova uzduž vijčane plohe te dolaskom u područje visokog tlaka naglo nestaje odnosno implodira. Implodzija je popraćena velikim ubrzanjem čestica tekućine koje udaraju u plohu tijela što dovodi do erozije vijčanih krila, skrokova i kormila, do šumova i do vibracija.

Kavitacija nastaje iznad određenog broja okretaja pri čemu nastupa razgrađivanje tekućine i gubitak poriva, a za krajnju posljedicu može imati i nemogućnost postizanja zadane brzine broda [3].

Za praksu je, međutim, važno poznavanje kavitacijskog broja to jest stanja tekućine kod kojeg kavitacija nastaje. Kako je već spomenuto kavitacija nastaje u trenutku kada lokalni tlak na vijku postigne istu vrijednost tlaka isparavanja okolne tekućine, a to izražavamo bezdimenzionalnim koeficijentom kako slijedi:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (43)$$

gdje je:

σ - kavitacijski broj ili bezdimenzijski koeficijent kavitacije,

p - tlak na mjestu osovine vijka $p = p_0 + \rho g h_s$,

p_v - tlak isparavanja tekućine,

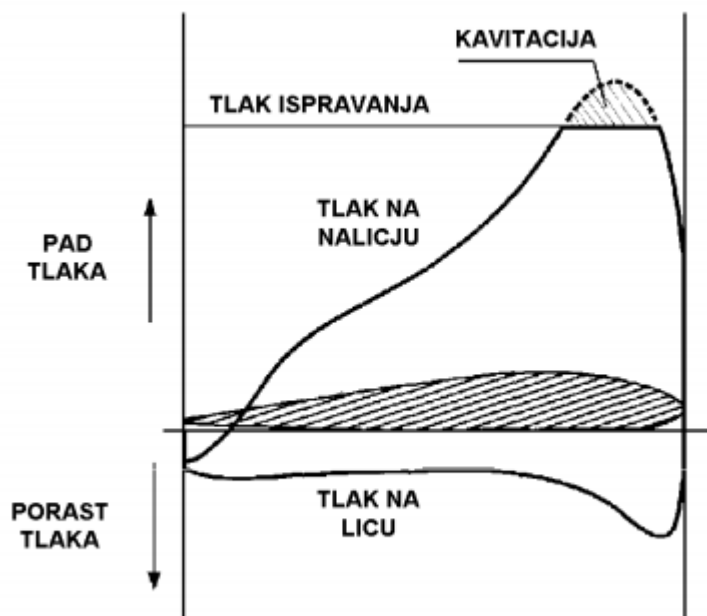
ρ - gustoća vode,

h_s - visina stupca vode do središta osovine vijka,

v - brzina strujanja vode.

Kavitacijski broj određuje vrijednost tlaka u kavitacijskom tunelu, a bezdimenzionalan je kako bi se lakše moglo uspoređivati i primjenjivati rezultate modela na stvarni brod.

Kao što je vidljivo iz izraza (43), kavitacijski broj ne ovisi o dimenzijama, obliku i položaju tijela u odnosu na strujanje već samo o parametrima strujanja - brzini, gustoći, tlaku kapljevine i tlaku isparavanja. To znači da je kavitacijski broj svojstvo strujanja i da određuje mjeru sklonosti kavitiranja kapljevine.



Slika 5. Profil krila s lokalnom kavitacijom [1]

Na Slici 5., [1], je prikazan raspored tlakova na nekom presjeku krila te je vidljivo da tlak na naličju krila pada ispod tlaka isparavanja vode što rezultira kavitacijom na tom mjestu.

Posljedica kavitacije je erozija, dakle trošenje krila na tom mjestu.

Smanjenjem uspona vijka povisit će se apsolutni tlak na naličju a da bi se postigao isti poriv potrebno je povećati ukupnu površinu krila. Budući da povećanjem površine krila raste i otpor trenja, veća površina znači ujedno i manju iskoristivost vijka pa je pri projektiranju vijka potrebno pronaći kompromis.

3.5.1. Kriteriji izbjegavanja kavitacije

Kako bi se što uspješnije izbjegla kavitacija postoje određene pojednostavljene jednačbe pomoću kojih je moguće procijeniti najmanju dozvoljenu površinu vijčanih krila, a da ne dođe do nastanka kavitacije.

Tako je Taylor dao jednostavnu jednačbu za određivanje najmanjeg potrebnog omjera projicirane površine, a da ne dođe do kavitacije, definiranu na sljedeći način:

$$\frac{A_p}{A_0} = 1,067 - 0,229 \cdot \frac{P}{D} \quad (44)$$

Za određivanje najmanjeg potrebnog omjera razvijene površine dobro služi Kellerova jednačba kako slijedi:

$$\frac{A_e}{A_0} = \frac{(1,3 + 0,3 \cdot Z) \cdot T}{(p - p_v) \cdot D^2} + k \quad (45)$$

gdje je:

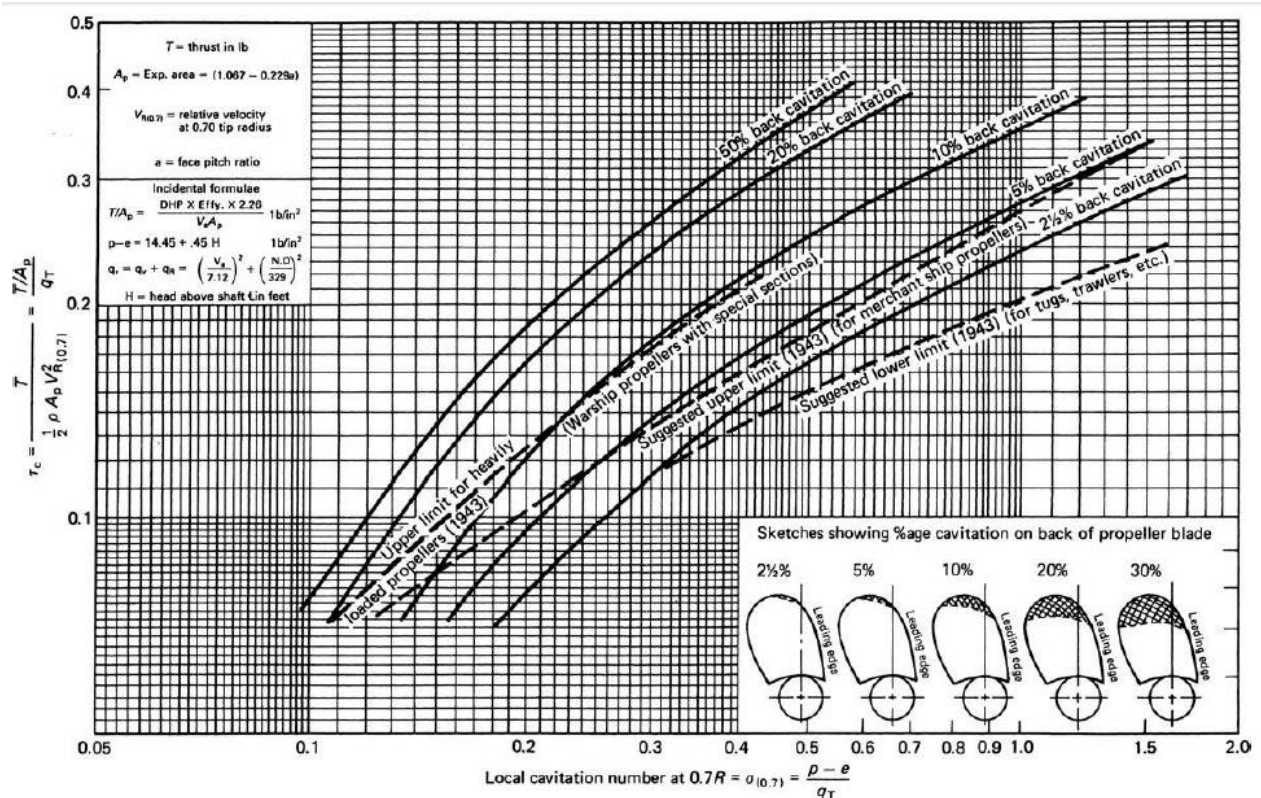
T - poriv vijka,

Z - broj krila vijka,

D - promjer vijka,

k - konstanta, varira od $k = 0$ za brze brodove do $k = 0,2$ za deplasmentske brodove.

Nešto precizniji pristup ima Burill čiji dijagram omogućuje prikaz postotka krila koji je zahvaćen kavitacijom, Slika 6., [4].



Slika 6. Burillov dijagram [4]

Na dijagramu je prikazan koeficijent poriva τ_c koji je definiran kao:

$$\tau_c = \frac{T/A_p}{q_T} \quad (46)$$

gdje je:

T - poriv vijka,

A_p - projicirana površina krila vijka,

q_T - dinamički tlak definiran kao $q_T = \frac{1}{2} \rho \cdot v_R^2$,

v_R - resultantna brzina strujanja na $0,7R$ definirana kao $v_R = \sqrt{v_A^2 + [2\pi N(0,7R)]^2}$.

Prema Burillu kavitacijski broj σ_R je definiran kao:

$$\sigma_R = \frac{p_0 - p_v}{q_T} \quad (47)$$

gdje je:

p_0 - statički tlak,

p_v - tlak isparavanja tekućine.

3.5.2. Tipovi kavitacije

Najčešće se kavitacija dijeli prema fizikalnoj prirodi njenog pojavljivanja.

Najprije je bitno pokazati da se kavitacija može podijeliti na onu koja nastaje u strujanju i na onu kojoj stujanje nije potrebno. Budući da se u razmatranju brodskog vijka očito pojavljuje strujanje ovdje će biti riječi samo o kavitaciji koja se pojavljuje u strujanju.

Takvu kavitaciju je dalje moguće podijeliti na:

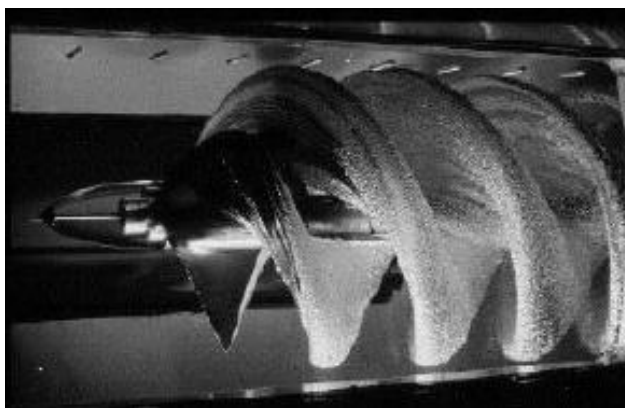
- mirujuću kavitaciju,
- putujuću kavitaciju.

Kod mirujuće kavitacije mjehurići zraka su uglavnom u nepromjenjivom odnosu prema tijelu, krilu vijka, dok kod putujuće kavitacije postoji jasno izražena nestacionarna slika spomenute pojave.

Osnovni oblici kavitacije su:

- Slojasta kavitacija, Slika 7., [4]. – javlja se na ulaznim bridovima krila na usisnoj strani, kada su dijelovi krila po pozitivnim upadnim kutovima dostrujavanja i na

tlačnoj strani kada su dijelovi krila pod negativnim upodnim kutovima dostrujavanja. Ovakva kavitacija je u većini slučajeva stabilna i sama ne izaziva eroziju krila.



Slika 7. Slojasta kavitacija [4]

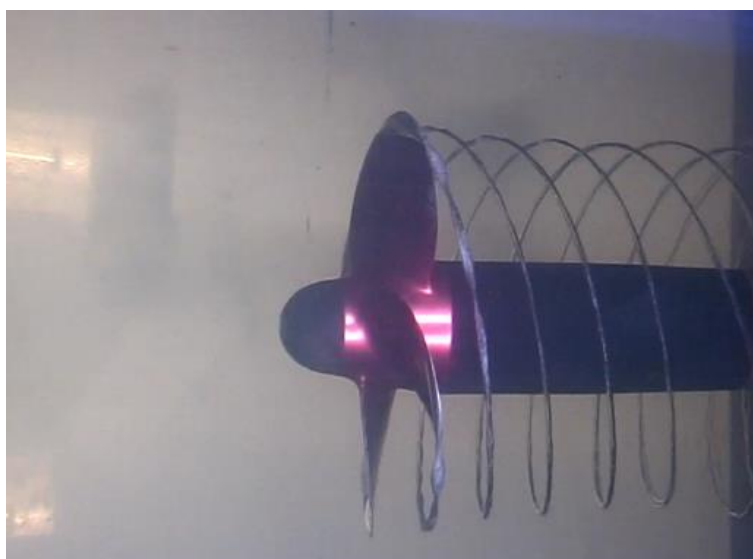
- Mjehuričasta kavitacija, Slika 8., [4] – javlja se pri sredini krila ili na mjestu najveće debljine odsječka uz umjerene upadne kutove. Na Slici 10. je prikazana ovisnost pojave kavitacije o upadnom kutu. Kada je gradijent tlaka pri nastajanju mjehuričaste kavitacije relativno malen, nastali mjehurići ostaju uz površinu krila, a implodiranjem mogu izazvati eroziju krila.



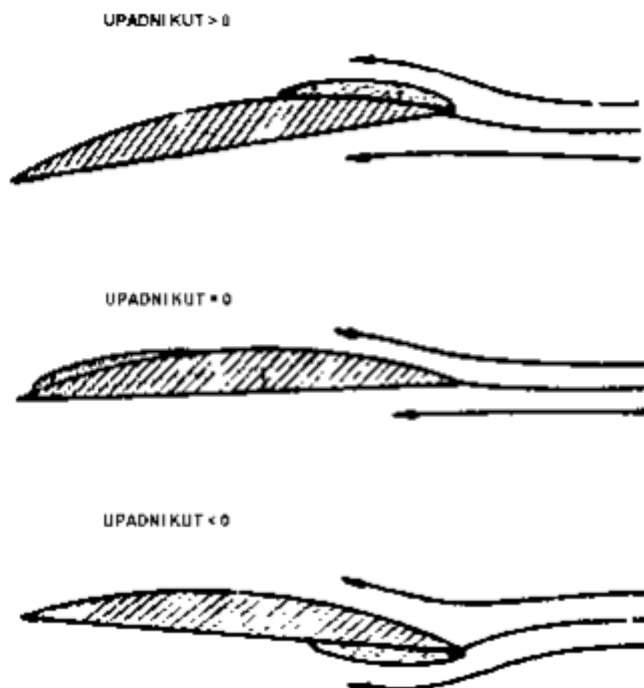
Slika 8. Mjehuričasta kavitacija [4]

- Magličasta kavitacija – javlja se iza mjesta gdje postoji slojasta kavitacija pri čemu fluid ne nastavlja homogeno slojasto strujanje nego se stvara vrtložno strujanje. Ovakva kavitacija izgleda poput magle i najopasniji je tip kavitacije.

- Vrtložna kavitacija, Slika 9., [4] – javlja se na vrhu krila ili na glavini, a nastaje od vrtloga krila koji su nedovoljno jaki da bi sami kavitirali. Najniži tlak je u sredini vrtloga pa se kavitacija javlja unutar jezgre vrtloga. Ovakva kavitacija na vrhu krila obično započinje iza vrhova vijčanih krila i u ranijoj fazi nije u dodiru s krilom. Jačanjem vrtloga ili snižavanjem tlaka fluida kavitacija dolazi u dodir s površinom krila.



Slika 9. Vrtložna kavitacija [4]



Slika 10. Ovisnost pojave kavitacije o upadnom kutu odsječka vijčanog krila [1]

3.5.3. Negativne posljedice kavitacije vijka

Proučavanjem kavitacije je ustanovljeno da su redom sve njene posljedice negativne, jedino se smatra kako umjerena kavitacija može biti od koristi čisteći vijak od obraštanja.

Do sada postoje četiri uočene važnije štetne posljedice kavitacije:

- uslijed promjene načina strujanja oko krila vijka nastaje promjena koeficijenta uzgona i otpora krilnih presjeka što dovodi do promjene hidrodinamičkih značajki vijka $K_T(J)$, $K_Q(J)$ i $\eta_0(J)$,
- vibracijske uzbudne sile koje vijak predaje trupu postaju i deseterostruko veće,
- implodiranje kavitacijskih mjehurića u neposrednoj blizini površine vijka što dovodi do erozije, Slika 11., [4],
- implozijom kavitacijskih mjehurića nastaje kavitacijski šum.

Sve navedene posljedice se ne javljaju istodobno.

Smanjenjem kavitacijskog broja prvi se pojavljuje kavitacijski šum, zatim dolazi do nastanka kavitacije i pojačavanja vibracijskih sila, a promjena hidrodinamičkih značajki nastupa posljednja.

Iz navedenog je očito da kavitaciju treba svakako izbjeći.



Slika 11. Erozija krila vijka [4]

4. OPĆENITO O BRODOCIKLU

Brodocikl (*eng. Waterbike*) je plovilo pokretano isključivo snagom ljudskih mišića. Prema međunarodnim pravilima za studentske regate brodocikala (International Waterbike Regatta – IWR) studenti moraju sami projektirati, izraditi i voziti brodocikl, Slika 12., [7].



Slika 12. Brodocikl [7]

4.1. Ljudski pogon

Prema pravilima regate, svi brodovi moraju porivnu silu ostvariti preko mišićne snage. Osnovna mišićna snaga treba biti proizvedena nogama. Bilo kakvo skladištenje energije prije samog početka utrke je zabranjeno. Dozvoljeno je da na svakom pojedinom brodu samo dvije osobe generiraju porivnu silu.

Prilikom same konstrukcije brodocikla, potrebna je informacija o pogonskoj snazi koja je pak potrebna za proračun čitavog pogonskog sustava kao i za odabir optimalnog propulzijskog uređaja.

Snaga mišićne kontrakcije razlikuje se od sile. Snaga je mjera ukupnog rada koji mišić obavi u zadanom vremenu. Ona nije određena samo silom mišićne kontrakcije nego i duljinom puta

skraćanja i brojem kontrakcija u minuti. Snaga mišićne kontrakcije mjeri se u vatima (W). Mišić ima snagu 1 W, ako rad od 1 J obavi u jednoj sekundi [5].

Upravo taj podatak je preduvjet za daljnje proračune.

Maksimalna snaga koju mogu postići svi mišići u tijelu dobro treniranog sportaša kad djeluju zajedno iznosi približno: 1200 W u početnih 8-10 sekundi, 650 W u sljedećoj minuti i 300 W u sljedećih pola sata.

Dakle, jasno je da čovjek može maksimalno povećati svoju snagu u kratkom vremenu, na primjer tijekom sprinta na 100 m, koji može završiti već za 10 sekundi, dok će pri dugotrajnijim disciplinama koje zahtijevaju izdržljivost, snaga mišića iznositi samo četvrtinu početne snage.

4.2. Tipovi brodocikla

Budući da ne postoje pravila o izgledu brodocikla, osim glavnih dimenzija, rješenja su vrlo inovativna i ovise o znanju i vještini pojedine ekipe dok su discipline osmišljene da dođu do izražaja performanse broda i kondicijska spremnost natjecatelja.

Prema tome, cilj je osmisлити takav projekt koji će u svakoj disciplini postići čim bolje rezultate.

Discipline na regati su sljedeće:

- 100m Sprint,
- 250m Sprint,
- Slalom,
- Forward-Stop-Backward (FSB),
- Acceleration (10m sprint),
- Bollard Pull,
- Long Distance,
- Secret Mission.

Obično brodocikli imaju oblik jednotrupca sa širom ili užom formom trupa ili oblik katamarana. Jednotrupci imaju vijak smješten na krmenom dijelu dok katamarani imaju izvedbe s dva propelera, po jedan na krmi iza svakog pojedinog trupa ili pak jedan propeler smješten u simetrali odnosno između dva trupa. Upravo takav slučaj je analiziran u ovom radu.

Kod konstrukcije rame brodocikla također postoje različite izvedbe: od onih gdje su vozači smješteni jedan pored drugog, Slika 13. ili jedan ispred drugog, Slika 14., pa čak do izvedbi gdje su vozači smješteni bočno u odnosu na smjer napredovanja broda. Neki vozači su u sjedećem položaju, neki u ležećem ili poluležećem, Slika 15., sve ovisi o kreativnosti timova koji ih izrađuju.



Slika 13. Asimetrična katamaranska forma, brodocikl „Annac“ [7]



Slika 14. Trimaranska forma, brodocikl „Clementine“ [7]



Slika 15. Klasična forma- jednotrupac, brodocikl „Imperator“ [7]

4.2.1. Brodocikli FSB-a

Povijest brodocikala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje seže u davnu 1996. godinu kad su studenti brodogradnje, ujedno i osnivači Hrvatskog udruženja studenata brodogradnje, izradili prvi brodocikl pod imenom „Vjera“, Slika 16. Poboljšana verzija se zvala „Gospon Zvir“, Slika 17., a 1998. godine je dovršena konačna verzija brodocikla pod imenom „Tvrd“, Slika 18.

„Tvrd“ je vrlo uspješno sudjelovao u međunarodnim regatama, proputovao pola Europe, a na regati u Genovi je osvojio i titulu najljepšeg brodocikla. Nakon toga je uslijedila verzija „Tvrdi“, a nakon toga i „Najtvrdi“.

Nakon niza uspješnih sudjelovanja na regatama, studenti su naumili ostvariti prvi brodocikl sa hidrauličkim prijenosom u svijetu te tako ozbiljno konkurirati projektnim rješenjima i rezultatima na regati. Projekt pod imenom „Pegula“ je uspješno proveden i dobitnik je posebne Rektorove nagrade za rad na brodociklu, tri Dekanske nagrade i tri nagrade „Davorin Bazjanac“.

„Pegula“ je dugi niz godina bila glavni konkurent i nositelj glavnih nagrada [5].

Nakon „Pegule“ je uslijedila verzija bez hidrauličnog prijenosa pod imenom „Pegula2“, Slika 19., koja je također bilježila odličan uspjeh na regatama. Slijedeće izmjene su provedene projektom pod imenom „Munja“, Slika 20., s kojim udruga bilježi zavidne rezultate zadnjih par godina.

Nedostaci i problemi koji su se pojavljivali na „Munji“ rješeni su projektom pod imenom „Borac“, Slika 21.

„Borac“ je specifičan po tome što je prvi brodocikl koji ima smješten pogon odnosno vijak na pramčanom dijelu, a ne kako je uobičajeno na krmenom dijelu.



Slika 16. Brodocikl "Vjera" [7]



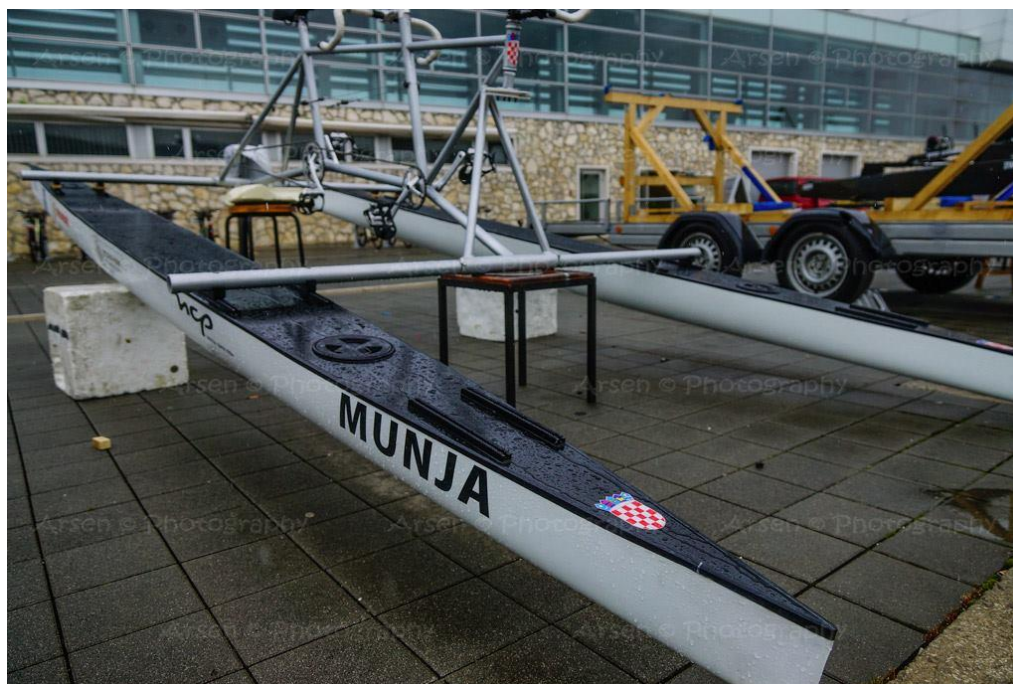
Slika 17. Brodocikl "GosponZvir" [7]



Slika 18. Brodocikl "Tvrd" [7]



Slika 19. Brodocikl "Pegula 2"



Slika 20. Brodocikl "Munja"

4.2.2. Borac

Na samom početku projektiranja brodocikla ključni kriterij pri odabiru tipa trupa brodocikla bio je ukupni otpor broda, pronalaženje odgovarajuće forme trupova i propulzijskog uređaja. Glavna referenca pri donošenju odluka bio je prijašnji projekt, dobitnik Rektorove nagrade, brodocikl „Pegula“, koji godinama postiže zavidne rezultate.

Projekt „Borac“ je nastao u nastojanju da se nedostaci na Peguli uklone i postignu još bolji rezultati na budućim regatama.

Tako je opet odabrana katamaranska forma. Trupovi su dugi 6 metara, a forma je slična teorijskom Wiglyjevom trupu. Na trupove je pričvršćena aluminijska konstrukcija na kojoj su položena sjedala za vozače, pogonska i upravljačka jedinica. Vozači su smješteni u simetrali broda, jedan iza drugoga, a gledaju prema pramcu broda. Ispred prednjeg vozača je upravljačka jedinica odnosno volan kojim je omogućeno zakretanje pogonske jedinice i mjenjanje smjera plovidbe. Pogonska jedinica je smještena dakle naprijed, na pramčanom dijelu broda i azipodnog je tipa.



Slika 21. Brodocikl "Borac"

4.3. Vijak brodocikla

Kao propulzijski uređaj odabran je brodski vijak koji ima visok stupanj korisnosti i danas je najčešći u primjeni.

Vijak je potpuno uronjen, ima dva fiksna krila i smješten je u simetrali između dva trupa na početku broda. Razlog zbog kojeg je vijak smješten na pramcu, a ne na krmi kako je inače uobičajeno, leži u dosadašnjem iskustvu na prijašnjem brodociklu kod kojeg je ustanovljeno da interferencija valova na krmenom dijelu ne pogoduje ispravnom radu vijka. Vijak radi u području turbulentnog strujanja te dolazi do gubitka poriva i brod je u vidljivoj zategi.

Navedeni problemi su riješeni upravo smještajem pogonske jedinice na pramčani dio broda gdje je prisutno nesmetano strujanje.

Natjecanja prijašnjih godina su pokazala kako je najveći problem prenijeti snagu s pedala na propulzijski uređaj. Prijenos snage s pedala do propelera je riješen lančanim i zupčastim prijenosom. Sklop zupčanika je postavljan u kutiju iznad stupa koji nosi propeler.

Vožnja krmom je omogućena zakretanjem čitavog stupa koji nosi bulb odnosno vijak, tako da biciklisti ne mijenjaju smjer vrtnje pedala, nego se propeler okrene u horizontalnoj ravnini na suprotnu stranu. Time je onemogućen pad stupnja korisnosti vijka zbog vrtnje pedala u suprotnom smjeru i postignuta je izvanredna upravljivost prilikom vožnje krmom.

Azipodni stup se zakreće putem čeličnog užeta koje vodi do upravljača smještenog ispred prvog biciklista. Takav način omogućava okretanje stupa za puna dva kruga. Na tijelu stupa je profilirano kormilo u obliku kapljice, napravljeno od polimernih materijala.

Kormilo dakle ima strujni profil i napravljeno je tako da ne dolazi do odvajanja strujanja.

5. PRORAČUN OTPORA I PROPULZIJE BRODOCIKLA

5.1. Proračun predane snage vijku

Snaga predana vijku P_D je direktno vezana uz snagu mišića vozača brodocikla. Podaci o snazi ljudskih mišića dobiveni su mjerenjima, a sastoje se od mjerenja na biciklističkom ergometru i spirometrije. Takva mjerenja pokazuju osim maksimalne moguće snage vozača i mogućnost podnošenja opterećenja u većim vremenskim intervalima potrebnim za maratonske discipline. Ispitivanja su provedena na Kineziološkom fakultetu u Zagrebu za potrebe proračuna prijašnjeg brodocikla Pegule, dobitnika Rektorove nagrade, a dotični podaci su korišteni u ovom radu [5].

Mjerenjima je utvrđeno da mišići dobro treniranog sportaša mogu trenutno, u prvih 8-10 sekundi, proizvesti 1200 W, u slijedećoj minuti 650 W, a u slijedećih 30 minuta 300 W.

Pošto većina disciplinskih utrka na regati redovito traje dulje od jedne minute a tek nekoliko njih je osmišljeno da traju kratko, kada vozači moraju dati svoj maksimum, odabrana snaga vozača za daljnje proračune je $P_B = 650\text{W}$.

Snaga predana vijku je zapravo snaga koju proizvode vozači umanjena za vrijednost gubitaka u lančanom i zupčastom prijenosu kako slijedi:

$$P_D = \eta_m \cdot P_B \quad (48)$$

gdje je:

$$\eta_m = 0,7 - \text{mehanički stupanj korisnosti}$$

Dakle, snaga predana vijku iznosi $P_D = 455\text{W}$.

5.2. Proračun ukupnog otpora brodocikla na mirnoj vodi

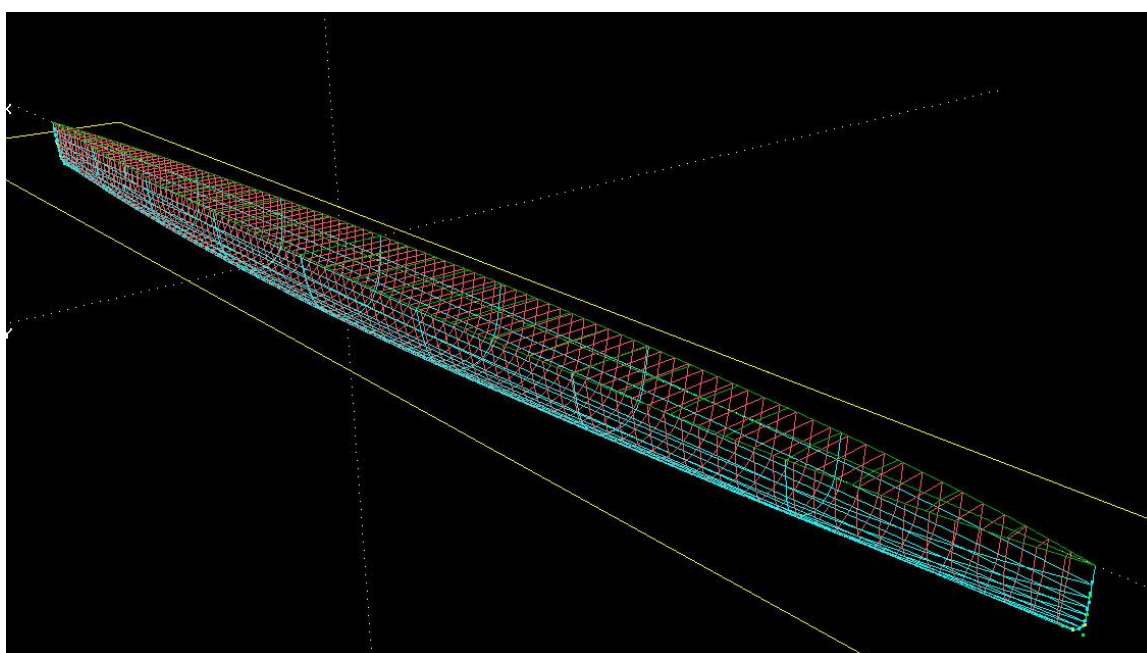
Za izračunavanje efektivne snage odnosno snage potrebne za tegljenje, potrebno je poznavati ukupni otpor broda i brzinu brodocikla kao što je definirano jednačbom (26).

Forma trupa broda je katamaranskog tipa.

U ovom radu je proveden proračun za određenu formu komponentnog trupa, s time da je razmak između komponentnih trupova unaprijed definiran.

Proračun ukupnog otpora je proveden za katamaransku formu sljedećih dimenzija:

- $L = 5,2 \text{ m}$ – duljina broda,
- $B = 0,32 \text{ m}$ – širina jednog trupa,
- $T = 0,14 \text{ m}$ – gaz broda,
- $S = 3,46 \text{ m}^2$ – oplakana površina jednog trupa,
- $C_B = 0,462$ – koeficijent punoće forme broda (blok koeficijent).



Slika 22. Forma jednog trupa katamarana [5]

Na Slici 22., [5], je prikazana 3D forma trupa katamarana. Na slici su prikazana rebra i vodne linije koje čine formu trupa broda.

Karakteristike vode su sljedeće:

- $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ - gustoća vode,
- $\nu = 1,13902 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ - kinematički koeficijent viskoznosti vode.

Da bi se moglo konkurirati na regati potrebno je postići brzine broda od 10-12 čvorova.

Zahtjevana brzina brodocikla je $V = 12\text{čv}$ odnosno $v = 6,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Silu ukupnog otpora broda, za svrhe ovog proračuna potrebno je podijeliti na komponente:

- otpor trenja,
- otpor valova,
- otpor privjesaka,
- otpor zraka.

Ukupni otpor se računa prema sljedećem izrazu:

$$R_T = R_F + R_W + R_{pp} + R_{AA} \quad (49)$$

Za izračunavanje sile ukupnog otpora koristi se jednačba (19).

Naposlijetku, da bi se mogla izračunati sila ukupnog otpora, najprije treba izračunati koeficijente pojedinih komponenata otpora: koeficijent otpora trenja, koeficijent otpora valova, koeficijent otpora privjesaka i koeficijent otpora zraka.

5.2.1. Koeficijent otpora trenja

Koeficijent otpora trenja C_F određujemo pomoću korelacijske linije model-brod ITTC'57 kako je prikazano u jednačbi (21). Za određeni raspon brzina koeficijenti trenja iznose:

$$v = \begin{pmatrix} 2,5 \\ 3 \\ 3,5 \\ 4 \\ 4,5 \\ 5 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad R_n = \begin{pmatrix} 1,102 \\ 1,322 \\ 1,542 \\ 1,763 \\ 1,983 \\ 2,203 \end{pmatrix} \cdot 10^7 \quad C_F = \begin{pmatrix} 2,95 \\ 2,86 \\ 2,786 \\ 2,275 \\ 2,673 \\ 2,627 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$$

5.2.2. Koeficijent otpora valova

Koeficijent otpora valova je određen pomoću teorijskog Wigleyjevog trupa koji je identičan trupovima prikazanim na Slici 22., a sve pomoću programskog paketa TWINHULL koji koristi linearnu teoriju potencijalnog strujanja.

Pomoću ovog programa dobiveni su podaci za koeficijente otpora valova za određene brzine odnosno Froudeove brojeve kako slijedi:

$$v = \begin{pmatrix} 2,5 \\ 3 \\ 3,5 \\ 4 \\ 4,5 \\ 5 \end{pmatrix} \frac{m}{s} \quad F_n = \begin{pmatrix} 0,35 \\ 0,42 \\ 0,49 \\ 0,56 \\ 0,63 \\ 0,7 \end{pmatrix} \quad C_w = \begin{pmatrix} 0,306 \\ 1,132 \\ 1,209 \\ 0,994 \\ 0,816 \\ 0,697 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Za potrebe proračuna ovaj koeficijent nije zasebno ekstrapoliran nego tek kasnije prilikom izračuna ukupnog otpora [5].

5.2.3. Koeficijent otpora privjesaka

U ovom slučaju otpor privjesaka stvaraju bulb koji je smješten iza propelera i služi kao završetak azipoda i stup koji taj bulb nosi. Bulb je strujno oblikovan. To je rotacioni profil iz serije NACA (NACA 0030) [5].

Koeficijent otpora bulba je dobiven integriranjem koeficijenata otpora profila po visini i korekcijom faktorom odnosa otpora kružnih profila i kugle. Faktor odnosa otpora kružnih profila i kugle je odnos otpora kugle i otpora niza beskonačno tankih kružnih profila koji sačinjavaju kuglu. To je približna metoda, jer je aproksimirano prestrujavanje fluida iz jednog sloja u drugi, ali kako je otpor bulba samo mali dio ukupnog otpora, greška učinjena tom aproksimacijom je prihvatljiva.

Presjek stupa je kružnica, jer taj stup služi kao osočina za okretanje bulba odnosno propelera. U cilju smanjivanja otpora, iza stupa su smještene ploče od polimernih materijala da se dobije oblik kapljice to jest, takozvani strujni profil koji služi kao kormilo.

Prema mjerenjima i proračunima za Rektorovu nagradu, koeficijent kormila iznosi 0,1, a koeficijent bulba 0,00115 [5].

5.2.4. Koeficijent otpora zraka

Otpor zraka je za brzine manje od 10 m/s, a o takvim je brzinama u ovom slučaju riječ, zanemariv u odnosu na ostale komponente otpora pa je on isključen iz daljnjeg razmatranja.

5.2.5. Koeficijent ukupnog otpora

Konačno, koeficijent ukupnog otpora je moguće dobiti jednostavnim zbrajanjem svih navedenih koeficijenata pa ukupni otpor onda iznosi:

$$R_T = 165,71 \text{ N}$$

Pomoću izračunatog ukupnog otpora trupa i zadane brzine moguće je izračunati snagu potrebnu za tegljenje kako slijedi:

$$P_E = 1022,92 \text{ W}$$

Za daljnji proračun jedna od bitnijih informacija je veličina poriva T , no najprije je potrebno odrediti koeficijent poriva t .

Kada tekućina struji oko trupa broda koji je tegljen i nema ugrađen vijak stvara se određeno polje tlaka koje ovisi o formi trupa broda. Ako na isti brod montiramo brodski vijak prilikom tegljenja pri istoj brzini polje tlaka se mijenja zbog rada vijka. Vijak uzrokuje povećanje brzine strujanja tekućine duž trupa broda i smanjuje lokalno polje tlaka na krmenom dijelu trupa broda što smanjuje ukupan efektivni poriv broda. Upravo to smanjenje poriva se izražava koeficijentom upijanja odnosno koeficijentom smanjenja poriva t [4].

Koeficijent poriva se obično određuje eksperimentalnim ispitivanjima i on za konvencionalne brodove najčešće iznosi 0,2.

Tijelo na temelju gibanja kroz tekućinu uzrokuje polje sustrujanja u smislu nejednoliko raspoređene brzine sustrujanja koja nastaje iza tijela. To vrijedi za brodove, podmornice, daljinski upravljana vozila i torpeda. Nastalo polje sustrujanja utječe na površinu vijka tako što povećava granični sloj i djeluje na komponentu stvaranja valova. Brzina sustrujanja je razlika između brzine broda i aksijalne komponente brzine dostrujavanja vode vijku i označava se kao w [4].

U ovom slučaju, vijak je uronjen u neometano strujanje, trupovi su dovoljno daleko od njega tako da ne utječu na tlakove usisavanja odnosno upijanja vode, niti ne stvaraju valove koji bi utjecali na njegov rad pa zbog toga se može pretpostaviti da koeficijent poriva ne postoji odnosno da je jednak nuli.

Također je azipodni propulzor smješten na pramcu, a brzina broda je jednaka brzini dostrujavanja vode vijku, pa je opravdana pretpostavka i da koeficijent sustrujanja ne postoji.

Poriv se u ovom slučaju može izračunati preko poznatog koeficijenta poriva, a veličina poriva je onda jednaka veličini otpora i iznosi:

$$T = 165,71 \text{ N}$$

5.3. Proračun vijka

5.3.1. Odabir i karakteristike serije vijka

Prije samog proračuna vijka potrebno je odrediti seriju vijaka po kojoj će se provesti proračun. Odabrana je Wageningenska B serija, jer je za tu seriju dostupno i poznato najviše podataka. Serija je najrasprostranjenija i najčešće korištena te ima širok raspon ispitanih karakteristika modela vijaka za koje su podaci dostupni u literaturi [4].

Wageningenska B serija obuhvaća vijke s 2 do 7 krila, omjerom površina A_E/A_0 od 0,3 do 1,05 a omjer uspon P/D od 0,5 do 1,4 što ujedno određuje raspone parametara korištene pri projektiranju vijka u ovom radu.

Serija je tijekom vremena proširivana novim modelima i ispravljana, a objavljeni su i dijagrami. Primjenjena je tehnika linearne regresijske analize i korekcija utjecaja Reynoldsovog broja. Regresijska analiza je obuhvaćena formulom jedinstvenom za B seriju u kojoj je obuhvaćen i broj krila.

Koeficijenti poriva i momenta računati prema jednadžbama (41) i (42) te vrijede za $Rn = 2 \cdot 10^6$.

U literaturi [5] su dane tablice s vrijednostima eksponenata s , t , u i v i koeficijenti $C_{s,t,u,v}^T$ i $C_{s,t,u,v}^Q$. Te vrijednosti su prikazane u Tablici 2.

Za vrijednosti koje odstupaju od navedenih provodi se korekcija ΔK_T i ΔK_Q pomoću posebnih regresijskih formula. Izrazi za ΔK_T i ΔK_Q su prikazani u Tablici 1.

Tablica 1. Korekcija ΔK_T i ΔK_Q

$$\begin{aligned}
\Delta K_T = & 0.000353485 \\
& - 0.00333758 (A_E/A_O) J^2 \\
& - 0.00478125 (A_E/A_O)(P/D) J \\
& + 0.000257792 (\log R_n - 0.301)^2 \cdot (A_E/A_O) J^2 \\
& + 0.0000643192 (\log R_n - 0.301)(P/D)^6 J^2 \\
& - 0.0000110636 (\log R_n - 0.301)^2 (P/D)^6 J^2 \\
& - 0.0000276305 (\log R_n - 0.301)^2 Z(A_E/A_O) J^2 \\
& + 0.0000954 (\log R_n - 0.301) Z(A_E/A_O)(P/D) J \\
& + 0.0000032049 (\log R_n - 0.301) Z^2(A_E/A_O) \\
& \quad \times (P/D)^3 J \\
\\
\Delta K_Q = & -0.000591412 \\
& + 0.00696898 (P/D) \\
& - 0.0000666654 Z(P/D)^6 \\
& + 0.0160818 (A_E/A_O)^2 \\
& - 0.000938091 (\log R_n - 0.301)(P/D) \\
& - 0.00059593 (\log R_n - 0.301)(P/D)^2 \\
& + 0.0000782099 (\log R_n - 0.301)^2 (P/D)^2 \\
& + 0.0000052199 (\log R_n - 0.301) Z(A_E/A_O) J^2 \\
& - 0.00000088528 (\log R_n - 0.301)^2 Z(A_E/A_O) \\
& \quad \times (P/D) J \\
& + 0.0000230171 (\log R_n - 0.301) Z(P/D)^6 \\
& - 0.00000184341 (\log R_n - 0.301)^2 Z(P/D)^6 \\
& - 0.00400252 (\log R_n - 0.301)(A_E/A_O)^2 \\
& + 0.000220915 (\log R_n - 0.301)^2 (A_E/A_O)^2
\end{aligned}$$

Tablica 2. Koeficijenti za poriv i moment

(K _T)						(K _Q)					
<i>n</i>	<i>C_{s,t,u,v}</i>	<i>s</i> (<i>J</i>)	<i>t</i> (<i>P/D</i>)	<i>u</i> (<i>A_E/A_O</i>)	<i>v</i> (<i>Z</i>)	<i>n</i>	<i>C_{s,t,u,v}</i>	<i>s</i> (<i>J</i>)	<i>t</i> (<i>P/D</i>)	<i>u</i> (<i>A_E/A_O</i>)	<i>v</i> (<i>Z</i>)
1	+0.00880496	0	0	0	0	1	+0.00379368	0	0	0	0
2	-0.204554	1	0	0	0	2	+0.00886523	2	0	0	0
3	+0.166351	0	1	0	0	3	-0.032241	1	1	0	0
4	+0.158114	0	2	0	0	4	+0.00344778	0	2	0	0
5	-0.147581	2	0	1	0	5	-0.0408811	0	1	1	0
6	-0.481497	1	1	1	0	6	-0.108009	1	1	1	0
7	+0.415437	0	2	1	0	7	-0.0885381	2	1	1	0
8	+0.0144043	0	0	0	1	8	+0.188561	0	2	1	0
9	-0.0530054	2	0	0	1	9	-0.00370871	1	0	0	1
10	+0.0143481	0	1	0	1	10	+0.00513696	0	1	0	1
11	+0.0606826	1	1	0	1	11	+0.0209449	1	1	0	1
12	-0.0125894	0	0	1	1	12	+0.00474319	2	1	0	1
13	+0.0109689	1	0	1	1	13	-0.00723408	2	0	1	1
14	-0.133698	0	3	0	0	14	+0.00438388	1	1	1	1
15	+0.00638407	0	6	0	0	15	-0.0269403	0	2	1	1
16	-0.00132718	2	6	0	0	16	+0.0558082	3	0	1	0
17	+0.168496	3	0	1	0	17	+0.0161886	0	3	1	0
18	-0.0507214	0	0	2	0	18	+0.00318086	1	3	1	0
19	+0.0854559	2	0	2	0	19	+0.015896	0	0	2	0
20	-0.0504475	3	0	2	0	20	+0.0471729	1	0	2	0
21	+0.010465	1	6	2	0	21	+0.0196283	3	0	2	0
22	-0.00648272	2	6	2	0	22	-0.0502782	0	1	2	0
23	-0.00841728	0	3	0	1	23	-0.030055	3	1	2	0
24	+0.0168424	1	3	0	1	24	+0.0417122	2	2	2	0
25	-0.00102296	3	3	0	1	25	-0.0397722	0	3	2	0
26	-0.0317791	0	3	1	1	26	-0.00350024	0	6	2	0
27	+0.018604	1	0	2	1	27	-0.0106854	3	0	0	1
28	-0.00410798	0	2	2	1	28	+0.00110903	3	3	0	1
29	-0.000606848	0	0	0	2	29	-0.000313912	0	6	0	1
30	-0.0049819	1	0	0	2	30	+0.0035985	3	0	1	1
31	+0.0025983	2	0	0	2	31	-0.00142121	0	6	1	1
32	-0.000560528	3	0	0	2	32	-0.00383637	1	0	2	1
33	-0.00163652	1	2	0	2	33	+0.0126803	0	2	2	1
34	-0.000328787	1	6	0	2	34	-0.00318278	2	3	2	1
35	+0.000116502	2	6	0	2	35	+0.00334268	0	6	2	1
36	+0.000690904	0	0	1	2	36	-0.00183491	1	1	0	2
37	+0.00421749	0	3	1	2	37	+0.000112451	3	2	0	2
38	+0.0000565229	3	6	1	2	38	-0.0000297228	3	6	0	2
39	-0.00146564	0	3	2	2	39	+0.000269551	1	0	1	2
						40	+0.00083265	2	0	1	2
						41	+0.00155334	0	2	1	2
						42	+0.000302683	0	6	1	2
						43	-0.0001843	0	0	2	2
						44	-0.000425399	0	3	2	2
						45	+0.0000869243	3	3	2	2
						46	-0.0004659	0	6	2	2
						47	+0.0000554194	1	6	2	2

Ove regresijske formule očito uvjetuju rad na računalu, ali zato omogućuju računanje hidrodinamičkih značajki za svaku željenu vrijednost parametara P/D , A_E/A_0 i J pa zato ovdje ne postoji problem interpolacije.

Također je potrebno odrediti i promjer vijka zbog dubine regatnih staza i zbog samih dimenzija azipodnog stupa na kojem je vijak kako ne bi došlo do izranjanja ili udaranja o dno

regatnih staza. Promjer vijka je tako određen u skladu s konstrukcijskim ograničenjima. Odabran je promjer vijka $D = 0,4\text{ m}$.

Proračun vijka i regresijska analiza provedena je u Microsoftovom programskom paketu Excel.

U Excel su uneseni regresijski podaci za koeficijente poriva i momenta kao i podaci za korekciju koeficijenata poriva i momenta prikazani u Tablicama 1. i 2.

Nadalje, pomoću alata Solver koji sadrži Excel moguće je izračunati koeficijente K_T i K_Q .

Rješavač (Solver) rješava zadani problem na način da varira vrijednosti u zadanim granicama dok ne nađe željenu vrijednost.

U ovom slučaju, varijable koje se variraju su prilagođene za Wageningešku B seriju za koju postoje dostupni podaci.

Koeficijent napradowanja vijka J se kreće u granicama od 0,01 do 1,4; omjer površina A_E/A_0 u granicama od 0,3 do 1,05; omjer uspona P/D od 0,5 do 1,4, a broj krila Z od 2 do 9.

Željeni cilj je postići što veću brzinu broda pa treba i taj podatak unijeti u rješavač na način da se postavi uvjet da brzina bude maksimalna.

Također, za ispravan rad alata i točno izračunavanje brzine, potrebno je unijeti ograničenje za broj okretaja vijka za koji je procijenjeno da se kreće u granicama od 1 do 30 okretaja u sekundi. Isto tako je potrebno ograničiti veličinu poriva, koja mora biti jednaka porivu izračunatom u poglavlju 5.2.5.

Na Slici 23. je prikazan skočni prozor rješavača u kojem su vidljiva ograničenja koja treba zadati, vrijednosti koje se variraju te željena izlazna vrijednost.

Solver Parameters [X]

Set Objective: [icon]

To: ☒ Max ☐ Min ☐ Value Of:

By Changing Variable Cells: [icon]

Subject to the Constraints:

\$J\$3 = \$P\$3	<div>Add</div> <div>Change</div> <div>Delete</div> <div>Reset All</div> <div>Load/Save</div>
AEAO <= 1,05	
AEAO >= 0,3	
J <= 1,4	
J >= 0,01	
PD <= 1,4	
PD >= 0,5	
Q = \$M\$3	
Z <= 7	
Z = integer	
Z >= 2	
n <= 30	
n >= 1	

☒ Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method: [v]

Options

Solving Method
Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

Help

Solve

Close

Slika 23. Unos parametara u Solver

5.3.2. Rezultati proračuna

Uz konstantni promjer vijka program je podešen tako da pronalazi maksimalnu postizivu brzinu. Uz proračunate karakteristike vijka, brzina koju brod može postići iznosi $v = 5,24 \text{ m/s}$.

Varirajući zadane parametre, rješavač pronalazi, uz maksimalno postizivu brzinu, pripadajuće hidrodinamičke karakteristike vijka sa vrijednostima koje iznose:

$J = 1,11$ - koeficijent napredovanja vijka,

$P/D = 1,1326$ - omjer uspona i promjera vijka,

$A_E/A_0 = 0,3$ - omjer površina vijka,

$Z = 2$ - broj krila vijka,

$n = 11,8 \text{ o/s}$ - broj okretaja vijka.

Također pomoću tih veličina rješavač izračunava koeficijente poriva i momenata te stupanj korisnosti, koji iznose:

$K_T = 0,04652$ - koeficijent poriva,

$K_Q = 0,009659$ - koeficijent momenta,

$\eta_0 = 0,85$ - stupanj korisnosti vijka.

Uz poznate koeficijente može se izračunati moment na vijku koji iznosi:

$$Q = 13,76 \text{ Nm}$$

Imajući na umu da su se u ovom slučaju zanemarili koeficijenti upijanja i sustrujanja što znači da je poriv jednak otporu broda, odnosno da je snaga poriva jednaka efektivnoj snazi.

5.4. Kavitacija

Nakon godina modelskih ispitivanja i proučavanja kavitacije, zaključeno je da pojava kavitacije na licu i naličju krila vijka uzrokuje smanjenje poriva, a može se spriječiti ili barem umanjiti povećavanjem površine krila vijka.

Na prijašnjem projektu brodocikla, vijak je bio smješten na krmenom dijelu broda, u simetrali između dva trupa. U tom slučaju, poprečni valovi koji se razvijaju za vrijeme plovidbe interferiraju malo ispred samog vijka što dovodi do pojave kavitacije, jer vijak radi u pojačanom turbulentnom strujanju.

Iako je u ovom projektu vijak smješten u neporemećeno strujanje i teorijski ne bi trebalo doći do kavitacije, svedeno je potrebno primjeniti kriterije za kavitaciju.

Dva najpoznatija kriterija za proračunavanje kavitacije su dali Burill i Keller.

U ovom radu je odabrana Burillova metoda za proračunavanje kavitacije, jer ona obuhvaća šire područje postizivih brzina i veličina vijaka, dok je Kellerova metoda pogodnija za upotrebu kod klasičnih konvencionalnih brodova.

Burillova metoda je pogodna za monolitne, konvencionalne vijke sa fiksnim krilima.

Na Slici 6. je prikazan Burillov dijagram koji se koristi tako da se najprije izračuna kavitacijski broj σ_R i pomoću te veličine je moguće iščitati koeficijent poriva τ_c . Preko koeficijenta poriva može se izračunati projicirana površina A_p . Nadalje je moguće izračunati razvijenu površinu vijka A_E koja u omjeru sa površinom diska vijka A_0 daje minimalnu površinu krila vijka za izbjegavanje nastanka kavitacije.

Za izračunavanje kavitacijskog broja potreban je statički tlak, dinamički tlak i tlak isparavanja tekućine. Za izračunavanje tlakova potrebna je dubina osovine propelera koja se proračunava kao što je prikazano na Slici 25. Na Slici 26. su prikazane komponente brzine strujanja.

Kavitacijski broj prema Burillu se računa kako je prikazano u jednadžbi (47) a iznosi:

$$\sigma_R = 1,517$$

Za proračun kavitacijskog broja su potrebne sljedeće veličine:

$$p_0 = p_a + p \text{ - statički tlak,}$$

$$p_a = 101325 \text{ Pa - atmosferski tlak,}$$

$$p = \rho g H = 5260,64 \text{ Pa - hidrostatski tlak,}$$

$$H = e + h \text{ - visina stupca vode do simetrane osovine propelera,}$$

$$e = 0,5 \text{ m - visina azipodne osovine,}$$

$$h = 0,007 \cdot L_{pp} = 0,036253 \text{ m,}$$

$$p_0 = 106585,6 \text{ Pa,}$$

$$p_v = 2337 \text{ Pa - tlak isparavanja tekućine,}$$

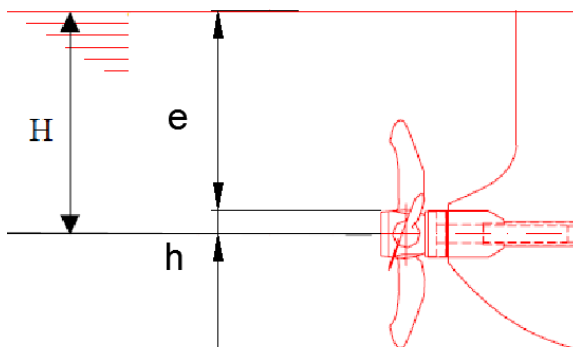
$$q_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{0,7R}^2 \text{ - dinamički tlak,}$$

$$v_{0,7R} = \sqrt{v_a^2 + [2\pi N(0,7 \cdot R)]^2} \text{ - brzina strujanja na } 0,7R.$$

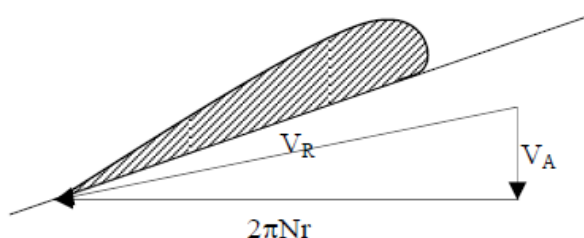
iz čega slijedi:

$$v_{0,7R} = 11,62 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$q_T = 69052,17 \text{ Pa}$$



Slika 24. Dubina osovine propelera



Slika 25. Određivanje brzine na 0,7R

Nakon određivanja kavitacijskog broja moguće je iz dijagrama očitati vrijednosti za koeficijent poriva koji iznosi:

$$\tau_c = 0,25$$

Iz formule za koeficijent poriva može se izračunati izraz za projiciranu površinu vijka koja glasi:

$$A_p = \frac{T}{q_T \cdot \tau_c} = 0,0094 \text{ m}^2 \quad (50)$$

gdje je T je poriv proračunat u poglavlju 5.2.5, A_p je projicirana površina krila vijka, a q_T je dinamički tlak na $r=0,7R$, koji je također izračunat u ovom poglavlju.

Uz poznatu projiciranu površinu lako se izračuna razvijena površina A_E kako slijedi:

$$A_E = \frac{A_p}{\left(1,067 - 0,229 \frac{P}{D}\right)} = 0,0117 \text{ m}^2 \quad (51)$$

Također uz poznati promjer vijka D , lako se odredi i površina diska vijka A_0 na sljedeći način:

$$A_0 = \frac{D^2 \pi}{4} = 0,1257 \text{ m}^2 \quad (52)$$

Uz dobivene vrijednosti A_E i A_0 moguće je dobiti najmanji omjer površina kod kojih, po Burillu, neće do kavitacije:

$$\frac{A_E}{A_{0 \text{ Burill}}} = 0,0928 \quad (53)$$

Vrijednost dobivena jednadžbom (53) je puno manja od vrijednosti dobivene proračunom, točka 5.3.2., što znači da u ovom slučaju neće doći do kavitacije na krilima vijka.

$$\frac{A_E}{A_0} > \frac{A_E}{A_{0 \text{ Burill}}}$$

5.5. Kontrola čvrstoće krila vijka

Kao i kod svakog drugog projekta brodskog vijka potrebno je provesti kontrolu čvrstoće.

Kontrola čvrstoće se provodi prema "Lloyd's Register of Shipping", Part 5, Chapter 7 [6].

Potrebno je provesti kontrolu čvrstoće na radijusu $0,25R$ i $0,6R$.

Za vijke koji imaju kut nagiba 25° i manji, kontrola čvrstoće se provodi na radijusu $0,25R$ za FPP vijke, na $0,35R$ za CPP vijke (zanemarujući svako povećanje omjera uspona zbog zakretanja) i na $0,6R$ za sve vrste vijaka. Minimalna debljina krila vijka t se proračunava kako slijedi:

$$t_1 = \frac{KCA}{EFULN} + 100 \sqrt{\frac{315MP}{EFRULN}} \quad (54)$$

gdje je:

$$K = \frac{GBD^3R^2}{675}, \quad (55)$$

$$M = 1 + \frac{3,75 \cdot D}{P} + \frac{2,8 \cdot P}{D}, \quad (56)$$

L - $L_{0,25}$, $L_{0,35}$, ili $L_{0,6}$, -razvijena duljina profila na određenom presjeku ,

G - gustoća,

U - dopuštena naprezanja,

B - omjer raširene površine i površine diska vijka.

D - promjer vijka

R - broj okretaja vijka

A - nagib vrha krila mjeren od osi vratila

U - dozvoljeno naprezanja materijala

N - broj krila vijka

P - snaga na osovini

E - 1

Tablica 3. prikazuje popis materijala za brodske vijke i pripadajuće karakteristike potrebne za izračunavanje koeficijenata u formuli (54).

U ovom slučaju, kod proračuna čvrstoće, odabrani materijal je nikal-aluminijska bronca (eng. Ni-aluminium bronze).

Tablica 4. prikazuje ostale parametre potrebne za izračunavanje minimalne debljine krila vijka. Odabrani parametri su za FPP vijke.

Tablica 3. Materijali za vijke

Material	SI units			Metric units		
	Specified minimum tensile strength N/mm ²	G Density g/cm ³	U Allowable stress N/mm ²	Specified minimum tensile strength kgf/mm ²	G Density g/cm ³	U Allowable stress kgf/mm ²
Grey cast iron	250	7,2	17,2	25	7,2	1,75
Spheroidal or nodular graphite cast iron	400	7,3	20,6	41	7,3	2,1
Carbon steels	400	7,9	20,6	41	7,9	2,1
Low alloy steels	440	7,9	20,6	45	7,9	2,1
13% chromium stainless steels	540	7,7	41	55	7,7	4,2
Chromium-nickel austenitic stainless steel	450	7,9	41	46	7,9	4,2
Duplex stainless steels	590	7,8	41	60	7,8	4,2
Grade Cu 1 Manganese bronze (high tensile brass)	440	8,3	39	45	8,3	4,0
Grade Cu 2 Ni-Manganese bronze (high tensile brass)	440	8,3	39	45	8,3	4,0
Grade Cu 3 Ni-Aluminium bronze	590	7,6	56	60	7,6	5,7
Grade Cu 4 Mn-Aluminium bronze	630	7,5	46	64	7,5	4,7

Tablica 4. Ostali koeficijenti za proračun debljine krila vijka

$$\left. \begin{aligned} C &= 1,0 \\ r &= \frac{P_{0,25}}{D} + 0,8 \\ M &= 1,0 + \frac{3,75D}{P_{0,7}} + 2,8 \frac{P_{0,25}}{D} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{za FPP vijke} \\ \text{na 0,2R} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} C &= 1,4 \\ F &= \frac{P_{0,35}}{D} + 1,6 \\ M &= 1,35 + \frac{5D}{P_{0,7}} + 2,6 \frac{P_{0,35}}{D} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{za CPP vijke} \\ \text{na 0,35R} \end{array}$$

$$\left. \begin{aligned} C &= 1,6 \\ F &= \frac{P_{0,6}}{D} + 4,5 \\ M &= 1,35 + \frac{5D}{P_{0,7}} + 1,35 \frac{P_{0,6}}{D} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{za sve vijke} \\ \text{na 0,6R} \end{array}$$

- Debljina krila na radijusu $0,25R$

Ostali koeficijenti za proračun debljine krila vijka:

$$F = \frac{P}{D} + 0,8 = 1,875 \quad (57)$$

$$L = L_{0,25R} = 0,0877$$

$$M = 7,4985$$

$$t_{0,25R} = 6 \text{ mm}$$

-Debljina na $r=0,25R$ je dobivena linearnom interpolacijom između $t_{0,2R}$ i $t_{0,3R}$.

- Debljina krila na radijusu $0,6R$

Ostali koeficijenti za proračunavanje debljine krila vijka:

$$F = \frac{P}{D} + 4,5 = 5,575 \quad (58)$$

$$L = L_{0,6R} = 0,1083$$

$$M = 7,4985$$

$$t_{0,6R} = 3 \text{ mm}$$

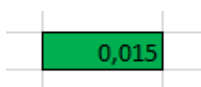
Iz provedenog proračuna čvrstoće krila vijka prema L'loyd registru se može zaključiti da minimalna debljina krila vijka na radijusu $0,25R$ mora biti 6 mm a na radijusu $0,6R$ mora biti 3mm.

6. PROGRAMSKI ALAT ZA ANALIZU I OPTIMIZACIJU VIJKA BRODOCIKLA

U ovom poglavlju je objašnjeno kako koristiti programski alat i koje parametre treba uzeti u obzir.

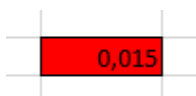
Optimizacijski program za proračun vijka je proveden u programu Excel.

Ćelije su označene različitim bojama te je u nastavku prikazana legenda koja objašnjava značenje boja i olakšava rukovanje programskim alatom.

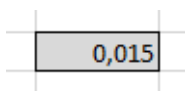


- zelenom bojom su označene ćelije koje prikazuju konstantne vrijednosti. To su vrijednosti ili druge varijable koje ne mijenju svoje karakteristike, na primjer: promjer vijka, gustoća i viskoznost tekućine i slično.

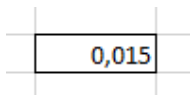
Ove vrijednosti ne treba mijenjati osim u slučaju optimizacije broda s drugim karakteristikama, u tom slučaju treba ručno unijeti adekvatne vrijednosti.



- crvena boja ćelija označava sve izlazne vrijednosti dobivene optimizacijom ili proračunom koje trebaju biti zadovoljene zbog raznih kriterija prikazanih u programu. Na ove ćelije treba obratiti pozornost.



- siva boja označava sve pomoćne vrijednosti potrebne za preračunavanje jedinica, u njim ne treba ništa mijenjati niti ih posebno uzimati u obzir.



- bijelom bojom su prikazane vrijednosti potrebne za izračunavanja izlaznih podataka i njih također nije potrebno mijenjati.

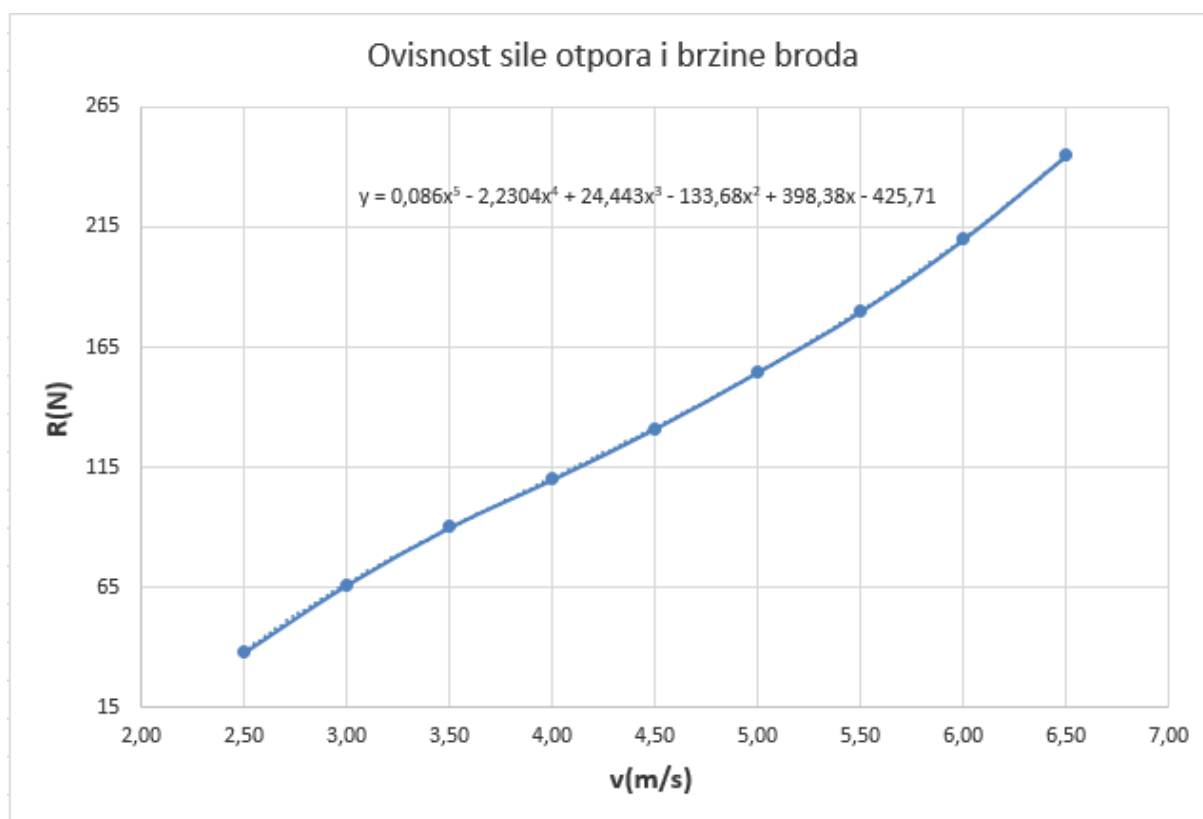
Slijedi prikaz i objašnjenje radnih listova programskog alata.

U Radnom listu „**1.Otpor i propulzija**“ izračunava se sila ukupnog otpora.

Postupak dobivanja otpora je proveden na uobičajen način za koji su potrebne geometrijske značajke trupa i snage pogonskih vozača koje ručno treba unijeti u odgovarajuće ćelije. Podaci koji su korišteni u programu su preuzeti iz projekta brodocikla [5].

U ovom Radnom listu je potrebno ručno unijeti i karakteristike tekućine, promjer vijka i broj okretaja pedala brodocikla.

Za brzine koje su veće od prikazanih u programu provedena je ekstrapolacija pomoću polinoma odgovarajućeg stupnja kako je prikazano na Slici 26.



Slika 26. Dijagram ovisnosti ukupnog otpora o brzini

U Radnom listu „**2.Optimizacija**“ provodi se izračun ostvarive brzine, provjera najmanjeg omjera površine kod kojeg neće doći do kavitacije i kontrola čvrstoće na specifičnim radijusima.

Ovdje treba pokrenuti naredbu „Solve“ za izračunavanje stupnja korisnosti vijka i maksimalno postizive brzine. U rješavač treba unijeti ograničenja za hidrodinamičke karakteristike na način kako je prikazano u poglavlju 5. ovog rada, Slika 23.

U Radnim listovima „**3.Kr**“ i „**4.Kq**“ su unesene vrijednosti koeficijenata potrebne za regresijsku analizu. Ovi radni listovi su zaključani, jer se podaci u njima ne mijenjaju, a neophodni su da bi program mogao raditi. Tablice koeficijenata su prikazane u poglavlju 5.3 ovog rada.

U radnom listu „**5.Kavitacija**“ je proveden proračun omjera površina krila vijka po Burillu kod kojih neće doći do kavitacije. Kod proračuna za novi brod u ovom dijelu treba unijeti podatke na način kako je opisano na početku ovog poglavlja.

U radnom listu „**6.Čvrstoća**“ nalazi se standardni proračun čvrstoće koji je provoden po pravilima L'loyd registra. Ovdje treba napraviti adekvatne izmjene u slučaju odabira drugačijeg materijala za vijak a sve prema tablicama danim u poglavlju 5.5 ovog rada.

7. ZAKLJUČAK

Dosadašnji projekti brodociklaa bili su podložni raznim promjenama u vidu promjene razmaka između trupova, promjene gaza te discipline u kojoj se želi postići najbolji rezultati. Osnovni cilj ovog rada je pronaći vijak koji će za zadanu katamaransku konfiguraciju brodocikla i zadani promjer vijka ostvariti maksimalan poriv odnosno makismalnu brzinu.

U ovom radu je osmišljen optimizacijski program koji za zadanu katamaransku konfiguraciju brodocikla pronalazi optimalan vijak koji maksimalno iskorištava uloženu snagu i ostvaruje maksimalnu brzinu.

Na temelju regresijskih formula korištenih u programu vrlo lako se dolazi do hidrodinamičkih značajki bitnih za daljnje projektiranje brodskog vijka.

Analiza je provedena za postojeći brodocikl Fakulteta strojarstva i brodogradnje pa se pokazalo da program daje zadovoljavajuće rezultate te da ga možemo prihvatiti kao adekvatan programski alat.

U programu su provedeni, osim proračuna hidrodinamičkih značajki, i potrebni proračuni za kavitaciju i čvrstoću vijka, tako da su programom obuhvaćeni svi parametri za konstrukciju vijka.

Velika prednost alata je što se do zadovoljavajućih rezultata može doći na brz i jednostavan način.

Programski alat povezuje konstrukcijske karakteristike vijka sa karakteristikama otpora i propulzije i vrlo je koristan u daljnjem radu na natjecateljskim brodovima te će olakšati projektiranje budućih brodocikala.

LITERATURA

- [1] Radan, D.: *Uvod u hidromehaniku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [2] Degiuli, N., „*Otpor i propulzija broda*“, interna skripta, FSB.
- [3] Sambolek, M.: *Propulzija broda*, Brodarski institut, Zagreb 2012.
- [4] Carlton, J.: *Marine propellers and propulsion*, Elsevier, Oxford, 2007.
- [5] skupina studenata: „*Proračun brodocikla za Rektorovu nagradu - projekt „Pegula*“, FSB, Zagreb, 2006.
- [6] <http://survey.lr.org/energy/FOIFL-MOU/2013-FOIFL-PART-5-JUNE-2013.pdf>
- [7] http://www.iwr2011.de/sub/gall/images/DSC_4267.jpg, internet

PRILOZI

I. CD-R disc